

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M.Eng.

PAR
David LAFORTUNE

ROBOTISATION DE L'ÉBAVURAGE DE PRÉCISION :
DÉVELOPPEMENT DE PROCÉDÉS GÉNÉRIQUES PAR GÉOMÉTRIE

MONTREAL, LE 16 AOÛT 2011

©Tous droits réservés, David Lafortune, 2011

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Zhaoheng Liu, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Tan Pham, examinateur interne
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Henri Champliand, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Canam Hoang, examinateur externe
Groupe de développement de l'automatisation, Pratt & Whitney Canada

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 22 JUILLET 2011

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier particulièrement M. Zhaoheng Liu, professeur au département de génie mécanique à L'ÉTS et directeur de mémoire, pour avoir chapeauté mon projet et m'avoir conseillé à chacune des étapes; M. Canam Hoang, ingénieur au département d'automatisation et de métrologie chez Pratt & Whitney Canada et superviseur en entreprise, de m'avoir offert cette opportunité ainsi que ses conseils tout au long de mon projet.

Je tiens aussi à remercier les étudiants stagiaires qui m'ont donné un coup de main tout au long de mon projet : Maxime Roy, Pierre-Philippe Poirier et Mathieu Lecours.

Finalement, je tiens à remercier David Mailhot, qui fut au départ un membre de l'équipe de projet chez Pratt & Whitney Canada en tant qu'étudiant à la maîtrise et qui est maintenant le chargé de projet, pour son travail remarquable à automatiser la cellule robotisée de développement.

ROBOTISATION DE L'ÉBAVURAGE DE PRÉCISION : DÉVELOPPEMENT DE PROCÉDÉS GÉNÉRIQUES PAR GÉOMÉTRIE

David Lafortune

RÉSUMÉ

L'ébavurage est une opération de fabrication inévitable qui ne peut être totalement éliminée. Toutes les arêtes d'une pièce comportent des bavures. Les bavures peuvent être déplacées, minimisées, mais pas éliminées. La plupart des procédés de fabrication connus génèrent des résidus de matière accrochés à la pièce dont il faut se débarrasser.

Or, l'ébavurage est trop souvent négligé ou peu d'effort sont mis pour l'améliorer. Par contre, pour certains domaines de haute technologie comme l'aéronautique, les pièces fabriquées possèdent une grande valeur lorsqu'elles arrivent à l'étape d'ébavurage. Il y a alors un grand intérêt à améliorer cette opération pour assurer la qualité du produit jusqu'à la dernière opération, surtout lorsqu'il s'agit d'ébavurage de précision. L'automatisation est une bonne façon de contrôler les procédés. Dans le présent document, la solution retenue pour l'automatisation de l'ébavurage est la robotisation.

La robotique a, jusqu'à maintenant, été conçue pour exécuter des tâches répétables, peu précises et pour des grands volumes de production. Ce mémoire propose donc de munir un robot d'un capteur de force pour compenser son erreur et réaliser des tâches de précision grâce à l'adaptabilité du contrôle de force. Il propose aussi d'utiliser la polyvalence des robots pour exécuter des tâches d'ébavurage variées afin de rencontrer les besoins des faibles volumes de production du secteur aéronautique.

Finalement, des résultats d'ébavurage robotisé sont présentés suite au développement de procédés génériques d'ébavurage. Ces résultats démontrent la capacité d'un robot, muni d'un contrôle de force, à réaliser des opérations d'ébavurage de précision.

Mots-clés : adaptabilité, contrôle de force, ébavurage de précision, ébavurage robotisé.

ROBOTIC PRECISION DEBURRING: GENERIC PROCESS DEVELOPMENT BY FEATURE

David Lafortune

ABSTRACT

Deburring is a manufacturing operation which inevitably cannot be totally eliminated. Every sharp edge of a piece has burrs. Burrs can be moved, minimized, but not eliminated. Most of the known manufacturing processes generate waste material clinging to the part that should get rid of.

However, the deburring is too often overlooked or little effort is made to improve it. On the other side, some high technology areas like aerospace have high value part to deburr. Then there is a great interest in improving the operation to ensure product quality until the last operation, especially when it comes to precision deburring. Automation is a good way to control processes. In this project, the solution for the automation is robotic deburring.

Robotic has so far been designed to perform repeatable and imprecise task and is more efficient for large production volumes. This thesis explores the use of force sensing to compensate robot imprecision and perform accurate tasks with the adaptability of force control. It also proposes to use versatility of robot to perform various deburring tasks and meets the needs of low production volume in the aeronautical sector.

Finally, robotic deburring results are presented following the development of generic processes for deburring. These results demonstrate the ability of a robot equipped with a force control to achieve precision deburring operations.

Key words: adaptability, force control, precision deburring, robotic deburring.

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1	PROBLÉMATIQUE	4
1.1	Le contexte aéronautique	4
1.2	La robotisation d'opérations manuelles d'ébavurage	5
CHAPITRE 2	OBJECTIFS	7
2.1	Démonstration de la faisabilité de robotiser l'ébavurage	7
2.2	Développement de procédés génériques par géométrie	8
2.3	Développement de procédés robustes et répétables	8
CHAPITRE 3	REVUE DE LITTÉRATURE ET NOTIONS DE BASES SUR L'ÉBAVURAGE	9
3.1	Sources d'imprécisions	10
3.1.1	Imprécisions intrinsèques à la fabrication de la pièce	10
3.1.2	Imprécision dues au positionnement de la pièce	12
3.1.3	Imprécisions dues à la calibration de l'environnement	13
3.1.4	Erreurs de positionnement et d'orientation des robots	14
3.2	Méthodes de calibration et d'inspection	15
3.3	Les types de bavure d'usinage et leurs principes de formation	17
3.3.1	Bavure d'entrée (Entrance burr)	18
3.3.2	Bavure de sortie (Exit burr)	18
3.3.3	Bavure Poisson (Poisson burr)	19
3.3.4	Bavure enroulée (Rollover burr)	19
3.3.5	Bavure déchirée (Tear burr)	21
3.3.6	Cas particuliers du perçage	21
3.4	Les différents procédés d'ébavurage	23
3.5	Les outils rigides	23
3.5.1	Les abrasifs friables	24
3.5.2	Les supers abrasifs	24
3.5.3	Les outils de coupe	25
3.6	Les outils flexibles	26
3.6.1	Les brosses	27
3.6.2	Les mousses	29
3.6.3	Les papiers sablés	29
3.7	Le contrôle adaptatif en force	29
CHAPITRE 4	MÉTHODOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT	33
4.1	Familiarisation avec les caractéristiques géométriques des pièces à ébavurer	33
4.1.1	Études des pièces et des géométries	34

4.1.2	Études des caractéristiques des géométries.....	35
4.1.3	Étude des bavures	41
4.2	Étude des procédés actuels d'ébavurage.....	45
4.3	Définition des besoins technologiques pour la robotisation	48
4.4	Élaboration des procédés d'ébavurage robotisés	50
4.5	Développement des technologies ciblées.....	65
4.6	Validation des procédés d'ébavurage	66
CHAPITRE 5	SÉLECTION DES SOLUTIONS ET DÉVELOPPEMENT DES TECHNOLOGIES.....	68
5.1	Sélection de la machine d'ébavurage : Robot vs CNC	68
5.2	Choix de la méthode de localisation des géométries	71
5.3	Développement de l'utilisation du contrôle de force pour l'ébavurage robotisé.....	77
5.3.1	Développement théorique	77
5.3.2	Développement expérimental	89
5.3.3	Facteurs influents le contrôle de force et les résultats d'ébavurage.....	102
5.3.4	Les limites du contrôle de force.....	108
5.3.5	Contrôle logiciel VS outil à compensation pneumatique	116
CHAPITRE 6	RÉSULTATS DU DÉVELOPPEMENT DES TECHNOLOGIES ET DES PROCÉDÉS D'ÉBAVURAGE.....	121
6.1	Résultats de l'utilisation du contrôle de force pour l'ébavurage robotisé	121
6.2	Résultats des procédés génériques d'ébavurage	125
6.2.1	Les Trous	125
6.2.2	Les Chambrages.....	127
6.2.3	Les Toits.....	128
CONCLUSIONS	130
RECOMMANDATIONS	132
ANNEXE I	TOLÉRANCES DE FORME ET DE POSITION	133
ANNEXE II	LISTE CATÉGORISÉE DES PROCÉDÉS D'ÉBAVURAGE	134
LISTE DES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	135

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
Tableau 4.1 Comparaison des avantages et désavantages des outils rigides et flexibles.....	47
Tableau 5.1 Erreur de position entre les TCP	76
Tableau 5.2 Plan de test pour déterminer l'influence	90
Tableau 5.3 Meilleur résultat obtenu pour le contrôle de force	92
Tableau 5.4 Pire résultat obtenu pour le contrôle de force	94
Tableau 5.5 Effet de la vitesse sur le contrôle de force	97
Tableau 5.6 Effet du <i>ForceChange</i> sur le contrôle de force	98
Tableau 5.7 Effet du <i>damping</i> sur le contrôle de force	99
Tableau 5.8 Série de test de décalage de la	109
Tableau 5.9 Série de test sur l'impact de l'erreur de positionnement du robot	111
Tableau 5.10 Résultats du test #1	112
Tableau 5.11 Résultats du test #2.....	113
Tableau 5.12 Résultats du test #5.....	114
Tableau 5.13 Série de tests supplémentaires	115
Tableau 5.14 Plan de test d'évaluation de l'outil à compensation pneumatique.	117
Tableau 5.15 Effet de la pression de compensation et de la pénétration de l'abrasif	118
Tableau 5.16 Effet de l'erreur de positionnement sur le résultat d'ébavurage	119
Tableau 6.1 Résultat d'un ébavurage robotisé avec outil rigide	124

LISTE DES FIGURES

	Pages
Figure 3.1 Variabilité du procédé	10
Figure 3.2 Exemple de tolérances dimensionnelles.....	11
Figure 3.3 Zone de tolérance cylindrique	12
Figure 3.4 De gauche à droite: (1) erreur de battement	13
Figure 3.5 Référentiels dans un environnement robotisé	13
Figure 3.6 Précision VS Répétabilité.....	15
Figure 3.7 Tête REVO	17
Figure 3.8 Formation d'une bavure d'entrée	18
Figure 3.9 Formation d'une bavure Poisson	19
Figure 3.10 Formation d'une bavure enroulée	20
Figure 3.11 Configurations d'usinage	20
Figure 3.12 Formation d'une bavure déchirée	21
Figure 3.13 Mécanismes de formation des bavures en perçage	22
Figure 3.14 Structure de la fabrication de l'électro-plaquage (1) et du P.B.S [®] (2).....	25
Figure 3.15 Les types de denture des outils de coupe	26
Figure 3.16 Brosse à poils hérissés axiale (gauche)	27
Figure 3.17 Méthodes d'utilisation des brosses	28
Figure 3.18 Schéma 3D d'un outil à compensation	30
Figure 3.19 Boucle de contrôle hybride simplifiée	31
Figure 3.20 Schéma de contrôle simplifié du target tracking	32
Figure 4.1 Trou, Chambrage et Toit	34

Figure 4.2	Toit, cas 1(sommet peu pointu) et cas 2 (crochet)	36
Figure 4.3	Configuration de chambrage : (1) simple, (2) avec rainure et (3) avec plats	37
Figure 4.4	Chanfreinage d'un trou sur un plan à l'aide d'un outil à chanfreiner	38
Figure 4.5	Configurations des trous (1) à travers un cylindre, (2) à travers des surfaces multiples et (3) à travers des surfaces complexes.....	38
Figure 4.6	Chanfrein d'un trou sur une surface (1) concave et (2) convexe.....	39
Figure 4.7	Calcul du Δ du chanfrein d'un trou sur une surface cylindrique	40
Figure 4.8	Trou percé à travers.....	40
Figure 4.9	Accessibilité et confinement facile (image gauche) et difficile (image droite)	41
Figure 4.10	Bavures des trois types de chambrage (simple, avec rainure et avec plat)	43
Figure 4.11	Formation des bavures de perçage pour les trous angulés	44
Figure 4.12	Outil rigide à gauche et outil souple à droite	46
Figure 4.13	Brossage de front d'un toit.....	52
Figure 4.14	Produit abrasif <i>unitized wheel</i> de 3M®.....	53
Figure 4.15	Schéma pour les calculs de pénétration progressive	54
Figure 4.16	Les trois cas communs, dans l'ordre, pour l'ébavurage des trous : le suivi de trajectoire, la pression et le lissage	58
Figure 4.17	Ratio D/d pour l'ébavurage des trous par la <i>méthode pressée</i>	59
Figure 4.18	Répartition des vitesses linéaires sur une sphère en rotation	60
Figure 4.19	Exemple de brosse de rodage (gauche) et de brosse à tube en nylon (droite)	62
Figure 4.20	Méthode d'ébavurage des trous avec la brosse radiale.....	64
Figure 5.1	Méthode de calibration par quatre points d'ABB	72
Figure 5.2	Représentation des cinq touches par cadran.....	75
Figure 5.3	Deux modules de force offerts par ABB pour l'ébavurage.....	78

Figure 5.4	Boucle de contrôle simplifiée de la force.....	81
Figure 5.5	Schéma de création du référentiel dynamique de force	83
Figure 5.6	Diagramme des efforts de coupe.....	84
Figure 5.7	Diagramme des efforts de coupe.....	84
Figure 5.8	Programmation des points d'entrée et de sortie d'une trajectoire en force.....	86
Figure 5.9	Impact de la programmation de l'entrée de la trajectoire en force.....	87
Figure 5.10	Impact de la programmation sur la sortie de la trajectoire en force.....	88
Figure 5.11	Trajectoire et résultat d'ébavurage pour un seuil de 20 %.....	100
Figure 5.12	Trajectoire et résultat d'ébavurage pour un seuil de 100%.....	101
Figure 5.13	Résultat d'ébavurage avec un seuil de 100% (à gauche) et avec un seuil de 1000% (à droite)	102
Figure 5.14	Trajectoire de référence et résultat d'ébavurage associé.....	110
Figure 5.15	Trajectoire et résultat d'ébavurage du test #10	111
Figure 5.16	Résultat d'ébavurage de la série de test supplémentaire	116
Figure 5.17	Représentation de la zone morte	120
Figure 6.1	Évolution du contrôle de force : (1) Contrôle en position, (2) Contrôle de force	122
Figure 6.2	Outillage pour l'ébavurage des trous : (1) Abrasif P.B.S [®] ,.....	126
Figure 6.3	Étapes de formation d'un rayon sur l'arête d'un trou (sur une surface plane)	126
Figure 6.4	Chanfreinage de l'arête interne d'un trou : l'outil, la bavure et le chanfrein	127
Figure 6.5	Bavure avant et chanfrein après ébavurage.....	128
Figure 6.6	Résultat d'ébavurage des <i>toits</i> : opération d'ébavurage à gauche et opération au baril de finition à droite	128

LISTE DES GRAPHIQUES

	Pages
Graphique 5.1 Graphique comparatif de vibration des moteurs rotatifs	106
Graphique 5.2 Impact des accélérations d'une trajectoire sur les vibrations	107

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

3D	trois dimensions
DH	Denavit-Hartenberg
CMM	coordinate measuring machine
P&WC	Pratt & Whitney Canada
RPM	rotation par minute
SME	society of manufacturing engineering
TCP	tool center point (référentiel d'outil)

INTRODUCTION

Dans le secteur manufacturier, un des objectifs importants est de fabriquer un produit à un rapport qualité prix plus avantageux que les concurrents pour se tailler une part de marché intéressante. Dans le domaine du transport aéronautique, la qualité est d'autant plus importante puisque la vie des gens est en cause. Cependant, non seulement la qualité est importante, mais, de nos jours, avec le prix du carburant et les enjeux environnementaux la performance devient de plus en plus critique. Le développement des technologies dans les méthodes de fabrication devient donc un élément clé pour l'amélioration du contrôle des procédés de fabrication.

Dans un ordre d'idée inéluctable s'emboîte le facteur économique qui dirige bien des décisions. En effet, la mondialisation des marchés apporte davantage de concurrents. Cette situation amène beaucoup d'innovation et de développement du génie. Par contre, elle apporte aussi une réalité quant aux coûts de main-d'œuvre qui diffèrent énormément selon le niveau de vie de chacun des pays. Les pays en développement sont de féroces concurrents qui nous obligent à revoir nos méthodes de fabrication afin de produire une meilleure qualité à moindre coût.

Le présent projet trouve donc sa place chez un industriel aéronautique basé au Québec, Pratt & Whitney Canada (P&WC). Ce projet fait partie d'un objectif plus grand d'automatisation de l'ébavurage qui a vu le jour il y a déjà plusieurs années. La première phase a été l'automatisation d'une série d'opérations d'ébavurage de finition faites à la main qui causait des risques de problèmes de santé et sécurité. Les procédés développés utilisent des outils flexibles, tel que des brosses, qui demandent peu de précision de positionnement, donc peu de besoin en technologie.

L'enjeu est différent à présent, il n'est plus seulement question de santé et sécurité, mais de plus en plus de coût et de qualité. Comme le disent Michael Massarsky et David Davidson [20] (2004, p.3) « Il va à l'encontre de la logique de négliger l'ébavurage et le polissage de

pièces de grande valeur en utilisant des méthodes qui sont ni sophistiquées ni contrôlées alors qu'il y a eu un investissement considérable pour usiner ces pièces avec précision et uniformité. »

Il faut, à présent, attaquer l'ébavurage dans son ensemble, c'est-à-dire toutes les opérations d'ébavurage depuis la sortie de la pièce de la machine d'usinage jusqu'au produit fini prêt à livrer. De nouveaux outils encore jamais expérimentés avec des robots ainsi que le développement de nouvelles technologies seront nécessaires au succès de l'entreprise de ce projet.

La problématique étant de robotiser des opérations manuelles d'ébavurage, les objectifs sont, d'une part, de démontrer la faisabilité de l'ébavurage avec un robot utilisant autant des outils flexibles que rigides. De ce fait, il sera démontré que le contrôle de force permet l'utilisation d'outils rigides d'ébavurage pour accomplir une tâche de précision. D'autre part, dans le but de simplifier les procédures et d'accélérer le développement dans un contexte où les pièces sont variées et en faible volume, il est fixé comme objectif de développer des procédés génériques par géométrie.

Le premier chapitre décrit clairement la problématique du contexte aéronautique pour le développement des procédés de fabrication. Il y est aussi décrit les facteurs menant à la robotisation de l'ébavurage.

Le second chapitre expose les objectifs. Tout d'abord, il est question de la démontrer la faisabilité de robotiser l'ébavurage par l'utilisation d'un capteur de force, puis d'explorer un voie de développement par géométrie.

Le troisième chapitre couvre la revue de littérature et des notions de base sur l'ébavurage. Il traite des sources d'imprécision, des technologies d'inspection et de calibration, des types de bavures, des procédés d'ébavurage, des abrasifs et du contrôle adaptatif en force.

Le quatrième chapitre traite de la méthodologie utilisée pour le développement. Le sujet est couvert depuis la familiarisation avec le produit jusqu'à la validation des procédés en passant par l'étude des procédés d'ébavurage actuels, la définition des besoins technologiques pour la robotisation, puis l'élaboration des procédés d'ébavurage robotisés ainsi que le développement des technologies.

Le cinquième chapitre présente le choix de la machine d'ébavurage ainsi que la méthode qui sera utilisée pour la localisation des géométries. Dans ce chapitre est aussi présenté le développement de l'utilisation du contrôle de force pour réaliser l'ébavurage robotisé avec des outils rigides.

Le sixième chapitre expose les résultats obtenus pour le développement de l'utilisation du contrôle de force ainsi que le développement des procédés génériques d'ébavurage des trous, des *chambrages* et des *toits*.

Finalement, le tout se termine par une conclusion qui fait un retour sur les objectifs et réalisations du projet, puis par une section de recommandations pour la continuation du projet ou de recherches reliées.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE

1.1 Le contexte aéronautique

Le secteur aéronautique n'est pas un secteur où le volume de production est très élevé comme peut l'être l'automobile ou même la fabrication de boulonnerie. Pour un fabricant de moteur d'avion comme P&WC qui produit quelques milliers de moteur par année, les lots de pièces peuvent varier de quelques dizaines à quelques centaines selon les modèles de moteur. De plus, étant donné les différentes gammes de moteur, il y a une grande diversité de pièces à produire. Les méthodes de production en série ne s'appliquent donc pas très bien dans un tel contexte. Par ailleurs, les dimensions et la forme des pièces varient beaucoup, ce qui diminue d'autant le choix des techniques d'égavurage disponibles. Dans le cas présent, les pièces ciblées sont rotatives et peuvent varier en diamètre et en longueur d'environ 5 à 20 pouces. Tout ceci résulte en un besoin évident de polyvalence et d'adaptabilité.

D'autre part, les pièces visées font partie de la section de compression et de combustion du moteur, donc elles sont soumises à des températures extrêmes et à des contraintes mécaniques élevées. Par conséquent, les matériaux dont les pièces sont constituées ne sont pas standards comme l'acier. Ce sont des matériaux et des alliages qui ont des propriétés mécaniques élevées. Malheureusement, de fortes propriétés mécaniques vont souvent de pair avec une faible usinabilité. Ce sont des matériaux très durs et difficiles à façonner. L'usinage est difficile sur la vie des outils et il en va de même pour les abrasifs dédiés à l'égavurage. Certains abrasifs s'useront très rapidement tandis que d'autres n'auront aucun effet. La sélection des outils et abrasifs sera donc importante.

Puis, il y a le degré de précision requis pour l'égavurage des pièces. Les standards d'égavurage sont stricts. Les arêtes se doivent d'être exemptes de bavures, formées d'un chanfrein ou d'un rayon se situant dans un intervalle de tolérance serré et avoir un fini de

surface spécifique et uniforme. En raison de ces requis, il est primordial de développer des procédés contrôlés qui permettent une robustesse et une répétabilité des résultats.

Bref, ce sont toutes ces particularités du secteur aéronautique qui complexifient le choix d'une méthode d'ébavurage automatique et qui créent des besoins technologiques importants.

1.2 La robotisation d'opérations manuelles d'ébavurage

Actuellement, encore une proportion importante de l'ébavurage, tout secteur confondu, se fait manuellement parce que c'est une technique qui est très polyvalente et adaptable, donc très pratique dans un contexte de production à petit volume. Par contre, il y a plusieurs points négatifs à l'ébavurage manuel.

Le premier effet négatif provient de la nature répétitive et minutieuse de la tâche. Les gens qui effectuent l'ébavurage doivent sans cesse répéter les mêmes mouvements qui sont parfois effectués dans des positions non ergonomiques. De plus, la concentration mentale nécessaire peut être très éreintante. D'autre part, les outils utilisés et les méthodes d'ébavurage pratiquées peuvent être sources de dangers physiques. Bref, il est possible de déduire qu'il y a là une source de problème de santé et sécurité. En effet, en approfondissant le sujet, il y a des cas de blessure au travail reliés à l'ébavurage, parfois des cas ponctuels, d'autre fois des effets à long terme voire permanents sur la santé des travailleurs. Notons par exemple les maux de cou et de dos ainsi que les tendinites.

Le second point à tenir en compte est la qualité du produit à livrer. Bien que l'ébavurage manuel soit très polyvalent, il est aussi très difficile à contrôler puisqu'il dépend beaucoup de la compétence des gens qui font l'ébavurage. Il va de soit qu'il faut employer et former une main-d'œuvre très spécialisée. Malheureusement, la constance des résultats d'un employé à l'autre, voire du même employé est difficile à atteindre étant donné la nature du travail à effectuer. Dans le contexte actuel où la performance des moteurs d'avion devient de plus en plus importante, il faut trouver des méthodes de fabrication qui permettent un meilleur

contrôle sur le résultat final, c'est-à-dire éliminer le plus de variables possible et contrôler celles qui restent.

Finalement, à cause de la mondialisation des marchés il faut diminuer les coûts et puisqu'il faut de la main-d'œuvre très spécialisé, une des options de diminution des coûts est d'automatiser partiellement les opérations manuelles d'ébavurage.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS

2.1 Démonstration de la faisabilité de robotiser l'ébavurage

La solution mise de l'avant au premier plan est celle de la robotisation de l'ébavurage. Étant donné la réalité du volume de production dans le secteur aéronautique ainsi que de la diversité des pièces, la grande polyvalence des robots semble bien se prêter à ce genre de tâche. L'objectif premier est donc de démontrer la faisabilité d'effectuer toutes les opérations d'ébavurage avec un robot. En effet, l'ébavurage se sépare en quatre étapes, soit : (1) enlever la bavure, (2) former l'arête par un chanfrein ou un rayon, (3) enlever les bavures secondaires laissées par la formation de l'arête et (4) polir les surfaces. Les étapes de finition 3 et 4 ont d'ores et déjà été démontrées comme étant réalisables dans beaucoup de situations. Par contre, les étapes 1 et 2 ont souvent été sources d'échec lors d'essais robotisés. Ce sont donc ces deux étapes de l'ébavurage dont il faut démontrer la faisabilité d'exécution à l'aide d'un robot.

Connaissant les causes des échecs du passé, il sera tenté dans les présents travaux d'améliorer la relation de précision du positionnement du robot par rapport à la région de la pièce à atteindre pour exécuter la tâche d'ébavurage. D'autre part, dans le but d'ajouter de la polyvalence au robot, certaines technologies seront greffées au robot pour lui donner des sens tactile et visuel lui permettant de s'adapter aux multiples variabilités en présence. L'objectif précis de ces démarches est de permettre l'utilisation d'outils rigides pour effectuer des enlèvements de matière. Puisque les outils rigides sont de nature peu enclins à admettre des erreurs de positionnement, il est nécessaire de développer des instruments pour rendre adaptable les outils rigides.

2.2 Développement de procédés génériques par géométrie

Un autre objectif principal est de développer des procédés d'ébavurage génériques par géométrie. Puisqu'il y a une très grande quantité de pièces, mais qu'un nombre très restreint de géométrie sur les différentes catégories de pièce, il est plus simple de couvrir la globalité des pièces en travaillant par géométrie. La vue d'ensemble se fait plus aisément de cette façon et les modèles redondants se distinguent rapidement. Bien entendu, des particularités distinctives sont présentes pour une même géométrie et ceci pourra mener à l'élaboration de procédés alternatifs. Le but ultime de cette approche est de standardiser l'outillage, les méthodes et paramètres d'ébavurage pour rendre réutilisable les procédés développées sur la diversité des pièces ciblées et, de ce fait, accélérer l'implémentation en production.

2.3 Développement de procédés robustes et répétables

Le dernier objectif va de pair avec le développement de procédés génériques. Il s'agit de développer des procédés qui soient robustes, c'est-à-dire qu'ils peuvent faire face aux variabilités qui surviennent dans le temps, et qui soient répétables, c'est-à-dire qu'ils donnent le même résultat à travers le temps.

Les procédés standardisés ont cet objectif de donner des résultats similaires pour une géométrie d'une pièce à l'autre. Les procédés seront définis de façon paramétrique de sorte que l'enlèvement de matière soit le même pour une géométrie qui varie d'une pièce à une autre. La paramétrisation permet de développer des procédés génériques robustes.

D'autre part, la répétabilité s'atteint par le contrôle des paramètres. Ceux qui peuvent varier, comme l'usure de l'abrasif, doivent être contrôlés de façon à ne pas affecter le résultat de l'ébavurage. C'est grâce à un environnement contrôlé qu'il est possible d'obtenir des résultats répétables.

CHAPITRE 3

REVUE DE LITTÉRATURE ET NOTIONS DE BASES SUR L'ÉBAVURAGE

Les méthodes de fabrication apportent leur lot d'imprécision et de variabilité sur les dimensions des pièces fabriquées. Par ailleurs, l'utilisation d'un robot pour une application d'ébavurage automatisé mène à plusieurs problèmes d'erreur de positionnement. Ces deux facteurs combinés conduisent ainsi à une incertitude de fabrication plus importante que le procédé conventionnel. Il s'impose donc de choisir ou de définir des méthodes de calibration du robot pour améliorer sa précision, mais il s'impose aussi de calibrer l'environnement pour connaître la position et l'orientation de la zone de travail et même de localiser des géométries sur une pièce pour effectuer un travail localisé.

Dans un autre ordre d'idée, il est nécessaire de comprendre les mécanismes de formation des bavures pour différents procédés de fabrication afin de bien orienter la sélection des outils abrasifs pour effectuer l'ébavurage. Dans le cas où les bavures sont sévères, il faudra utiliser des outils rigides capables de faire l'enlèvement de matière. Il peut aussi être intéressant de remonter à la source pour minimiser les bavures et faciliter l'opération d'ébavurage.

Étant donné que l'utilisation d'outils rigides s'avère essentiel et qu'ils nécessitent une précision élevée de positionnement, puis que d'un autre côté les robots ne peuvent pas offrir une précision absolue, il devient primordial d'introduire un contrôle adaptatif pour permettre l'utilisation d'outils rigides avec un robot. Le contrôle de force a le potentiel de pouvoir remplir ce besoin. Dans ce qui suit, une revue littéraire ainsi qu'une présentation générale sur plusieurs éléments touchant l'ébavurage des pièces rotatives et la robotisation de ce procédé seront données.

3.1 Sources d'imprécisions

Il y a plusieurs sources de variabilité à considérer outre l'imprécision du robot pour effectuer une tâche d'ébavurage sur une région spécifique d'une pièce. David Joseph Giblin [10] dénote, sans considération de l'équipement utilisé pour faire l'ébavurage, deux sources de variabilité qu'il est impossible de supprimer. Il s'agit des tolérances dimensionnelles et géométriques des pièces imputables aux procédés de fabrication et du positionnement de la pièce dans un montage assemblé.

3.1.1 Imprécisions intrinsèques à la fabrication de la pièce

Étant donné que la précision absolue est impossible, les pièces sont fabriquées selon des intervalles de tolérances dimensionnelles et géométriques qui dépendent des fonctionnalités mécaniques de celle-ci. Ces intervalles de tolérance peuvent être plus ou moins grands dépendamment de la précision requise. Bien entendu, un procédé en contrôle devrait varier uniquement sur une partie de la bande de tolérance se situant entre la limite inférieure de spécification (LIS) et la limite supérieure de spécification (LSS), donc limiter la variation (*Figure 3.1*).

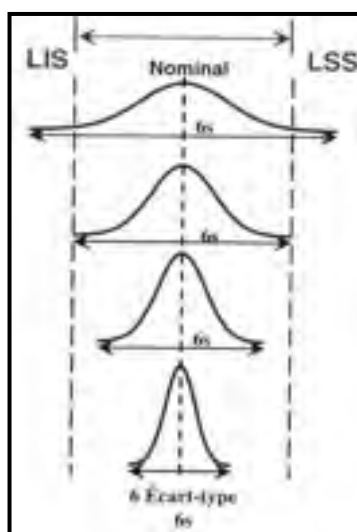


Figure 3.1 Variabilité du procédé
VS bande de tolérance

Cependant, vu le faible volume de production dans le secteur aéronautique, il est peu commun de pouvoir faire un contrôle statistique adéquat des procédés de fabrication. Les populations de pièce sont tellement faibles qu'il est difficile, voire même parfois impossible d'avoir des échantillons représentatifs qui permettent de réagir à des modèles, de cibler la problématique et de corriger la situation pour conserver le procédé en contrôle et limiter les variations dimensionnelles.

Il existe deux types de variabilité liés aux tolérances de fabrication. La première est la tolérance dimensionnelle. Elle a une influence sur la position et la dimension de la géométrie. Par exemple, un trou de 5 mm percé à une distance de 10 mm en X et en Y des bords d'une plaque pourra avoir un intervalle de tolérance de plus ou moins 0.1 mm sur toutes ses dimensions. Dans l'exemple de la *Figure 3.2*, les tolérances dimensionnelles agissent sur une ou deux dimensions. Elles ne sont jamais tridimensionnelles.

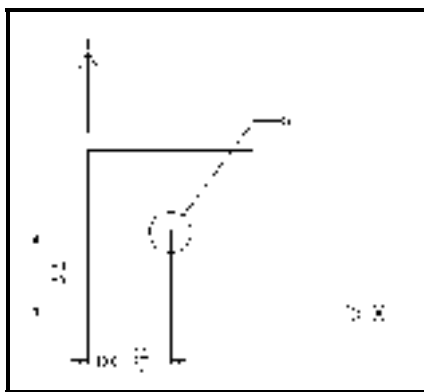


Figure 3.2 Exemple de tolérances dimensionnelles

D'autre part, il y a la tolérance géométrique qui peut influencer la forme et la position d'une géométrie. Elle agit de façon tridimensionnelle sur une géométrie. L'exemple précédent peut être repris dans un contexte de tolérance géométrique. La position du trou peut être spécifiée sans tolérance dimensionnelle, mais plutôt avec une tolérance géométrique de localisation qui induit une nouvelle dimension. Cette tolérance définit un volume cylindrique dans lequel doit se trouver l'axe du centre du trou. L'exemple est très bien illustré à la *Figure 3.3*.

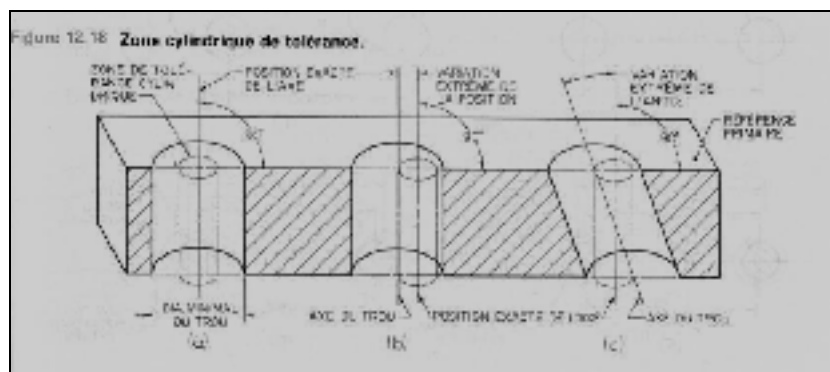


Figure 3.3 Zone de tolérance cylindrique
Tirée de Giesecke (1982, p.353 [11])

Il existe d'autres tolérances géométriques comme le parallélisme et la perpendicularité qui sont présentées à la *Figure-A I-1* de l'annexe I.

3.1.2 Imprécision dues au positionnement de la pièce

Le positionnement d'une pièce dans l'environnement d'une machine se fait par le biais d'un montage assemblé. Or, ce montage n'est pas parfait et pas nécessairement identique d'une fois à l'autre. Dans le cas présent, les pièces ciblées sont rotatives. Les opérations d'ébavurage seront faites avec la pièce en rotation ou sur des géométries répétitives en indexant la pièce. Les pièces seront donc serrées sur un mandrin rotatif. Cependant, l'assemblage de la pièce sur le mandrin ne sera pas parfaitement précis ni répétable. Il peut y avoir des erreurs de perpendicularité et de battement qui se glissent dans le montage de la pièce. La *Figure 3.4* montre le type d'erreur possible.

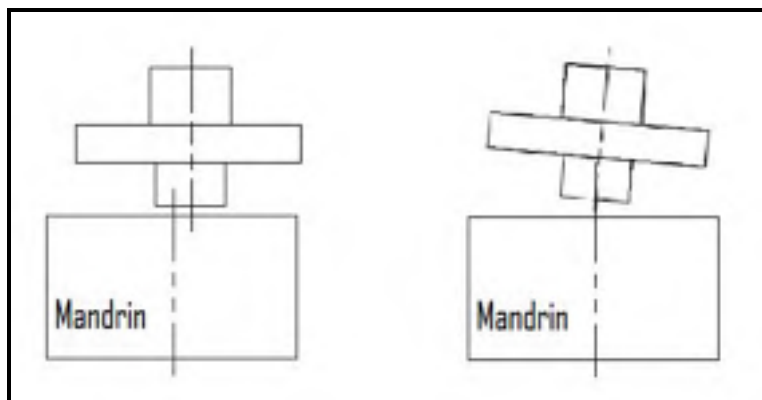


Figure 3.4 De gauche à droite: (1) erreur de battement
(2) erreur de perpendicularité

3.1.3 Imprécisions dues à la calibration de l'environnement

Le cas étudié est celui d'une cellule robotisée. Pour un robot, il est important de connaître des positions de références par rapport à son référentiel de base pour pouvoir se déplacer et exécuter des tâches aux bons endroits dans son environnement (*Figure 3.5*). L'autre élément important est le référentiel de l'outil du robot. Sa position et son orientation doivent être connues par rapport à la base du robot pour que celui-ci sache quel point du robot doit se rendre à une position et une orientation donnée.

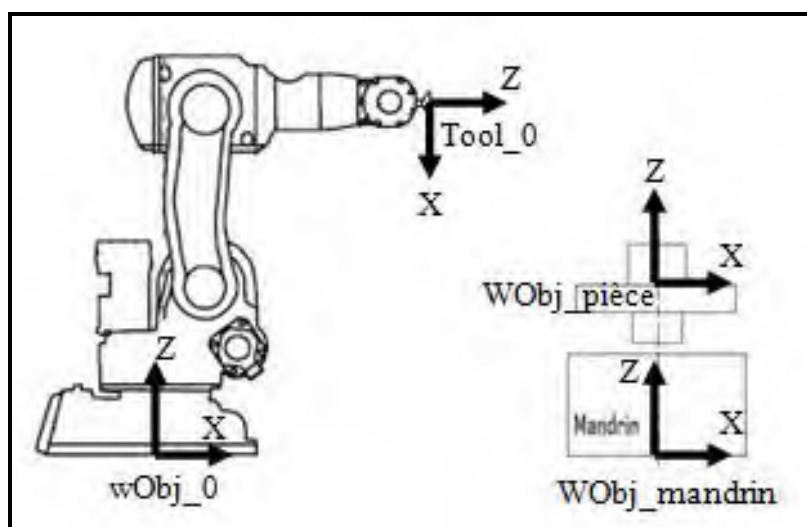


Figure 3.5 Référentiels dans un environnement robotisé

Étant donné que les pièces cibles sont rotatives, symétriques et qu'elles possèdent, comme il a été dit précédemment, des sources d'erreurs dimensionnelles et géométriques, il est nécessaire de relocaliser les géométries de la pièce et de définir des points de référence pour la pièce et sa géométrie.

Tous ces référentiels doivent être définis par calibration. Les méthodes de calibration choisies doivent considérer le besoin en précision dans un volume donné, la relation entre les différents référentiels d'outil le cas échéant, le besoin en robustesse et répétabilité de la méthode, puis de la non-linéarité des robots qui peuvent mener à des imprécisions.

3.1.4 Erreurs de positionnement et d'orientation des robots

Une multitude de pièces variées et des trajectoires d'égavurage complexes requiert un outil de programmation hors-ligne. Les logiciels de programmation hors-ligne comporte un environnement de simulation virtuelle en trois dimensions dans lequel on peut construire la cellule robotisée et y insérer les pièces sur lesquelles on désire travailler. Cependant, l'utilisation d'un outil de programmation hors-ligne demande une précision de positionnement accrue du robot par rapport à la pièce.

Selon Kevin L. Conrad [6], 97% de l'erreur de positionnement d'un robot provient de la différence entre la cinématique du robot connue par le contrôleur et la cinématique réelle. Il rapporte que l'erreur de la position du référentiel d'outil par rapport à la référence de la base provient de la dimension et de l'élasticité des joints, des moteurs, des encodeurs, des méthodes de construction des robots ainsi que des capacités du contrôleur.

Conrad [6] indique trois paramètres qui permettent de définir la performance du positionnement d'un robot, soit la répétabilité, la précision et la résolution. La répétabilité est la capacité du robot à retourner à un point depuis un même point de départ tandis que la précision est sa capacité à se déplacer à une position exacte dans un environnement 3D (*Figure 3.6*).



Figure 3.6 Précision VS Répétabilité.

Puis la résolution est le plus petit déplacement que le robot peut faire. Or, les manufacturiers de robot fournissent généralement uniquement la répétabilité du robot en position. L'expérience montre que la répétabilité en orientation tend à varier beaucoup selon la configuration des axes du robot.

Pour reprendre les dires de Conrad [6], chaque robot a sa propre signature qui provient entre autre des tolérances de fabrication, mais aussi du poids de l'outil à l'extrémité de robot. Cette signature affecte la précision absolue et la répétabilité selon la position de l'outil par rapport à la base puisque la charge affecte la déflexion des liens et les couples aux joints. D'ailleurs, les résultats d'expérimentation de Motta et *al.* [21] démontrent bien ce fait.

3.2 Méthodes de calibration et d'inspection

Due aux sources d'imprécision qui causent des erreurs de positionnement et d'orientation du robot, une calibration de celui-ci ainsi que de son environnement devient nécessaire pour

effectuer des tâches de précision. Étant donné que 97% de l'erreur en position et en orientation du robot provient d'une cinématique erronée selon Conrad [6], plusieurs chercheurs ont tenté de développer des méthodes pour définir plus précisément les paramètres de Denavit-Hartenburg (DH) [23] pour corriger la cinématique des robots industriels. Stone [28] a développé une technique qui consiste à positionner le robot au repos (tous les axes à zéro) et de faire tourner un axe à la fois tout en mesurant la position de l'effecteur par un système de mesure externe (un système Optotrack par exemple). L'objectif de cette méthode est de faire une moyenne des points mesurés pour calculer l'équation d'un plan de rotation, de déterminer le centre de rotation, puis de calculer le rayon de rotation. De cette façon, il est possible de calculer les longueurs de joints et de déterminer les paramètres DH propre à chaque robot et calculer leur cinématique avec plus de précision. Par contre, la méthode de calcul de Stone [28] est limitée à des axes non parallèles. Cependant, Abderrahim et Whittaker [4] ont développé une méthode de calcul basée sur celle de Stone [28] qui permet aussi le calcul des paramètres DH entre des axes parallèles, donc la capacité de calculer la cinématique de n'importe quel robot industriel.

Il existe d'autres méthodes pour améliorer la précision en robotique. Raucourt et *al.* [24] soulignent que la gravité et les inerties des membrures d'un robot ont une grande influence sur la précision. L'estimation des paramètres de la matrice d'inertie serait peu précise et engendrait des erreurs dans la compensation des couples d'inertie. Ils ont développé une méthode permettant d'estimer avec précision les paramètres de la matrice d'inertie. De cette façon, il est possible de compenser les couples inertiels et obtenir une meilleure précision de positionnement du robot.

Il existe plusieurs méthodes avec ou sans contact pour faire la calibration d'un robot ou d'éléments de son environnement. Ces méthodes font appel à des technologies laser, de caméra haute résolution, de palpeur en contact, etc. Ce qui suit est une description non exhaustive des technologies d'inspection ou de calibration disponibles sur le marché.

En premier lieu, il y a le palpeur qui est très utilisé en métrologie. Une version polyvalente connue sous le nom de tête REVO [25] est composée, en plus du palpeur, de deux axes rotatifs qui permettent de courts déplacements dans des configurations complexes et une prise de mesure de façon dynamique. La *Figure 3.7* montre un exemple de tête REVO.



Figure 3.7 Tête REVO
Tirée du site web de Renishaw [25]

Son fonctionnement est par contact mécanique. Il permet de localiser des géométries sur une pièce dans un environnement incertain. Sa précision dépend de la machine qui le supporte.

En second lieu, il y a des technologies sans contact comme le scanner 3D. Il s'agit de projeter un laser ou un faisceau lumineux sur la zone à inspecter, puis un capteur reçoit la lumière réfléchi et un algorithme traite l'information lue. Par contre, il peut y avoir de l'interférence et de la distorsion causée entre autre par la réflectivité de la surface qui diminue l'efficacité et la précision des lectures.

Enfin, il y a des caméras de vision intelligentes qui permettent de localiser des formes géométriques dans une zone de recherche.

3.3 Les types de bavure d'usinage et leurs principes de formation

Il y a plusieurs types de bavure qui se forment pour la plupart des procédés. En l'occurrence, Gillespie [15] et Dornfeld [9] dénotent cinq types de bavure pour l'usinage et leur

classification est définie en fonction des différents mécanismes de formation. Il s'agit des bavures d'entrée (*Entrance burr*) et de sortie (*Exit burr*) de l'outil de la pièce. Il y a aussi les bavures enroulées (*Rollover burr*) et les bavures déchirées (*Tear burr*), puis il y a les bavures Poisson (*Poisson burr*).

3.3.1 Bavure d'entrée (Entrance burr)

Ce type de bavure, comme son nom le dit, se forme lorsque l'outil d'usinage pénètre la pièce. Lors de l'entrée de l'outil, la pièce se déforme et une partie du matériau s'écoule en direction opposée à celle de l'outil. (*Voir Figure 3.8*)

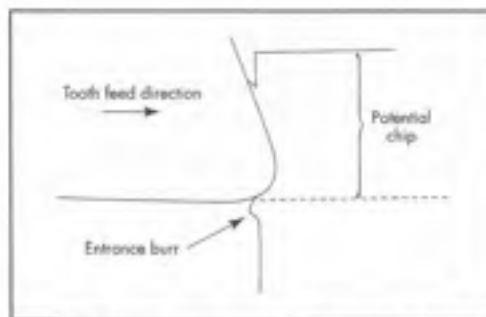


Figure 4-2. Cutting edge produces indentation burr as it enters workpiece.

Figure 3.8 Formation d'une bavure d'entrée
Tirée de Gillespie (1999, p.53 [2])

Ce type de bavure ressemble un peu à la crête que crée la déformation d'un test de dureté sur une pièce.

3.3.2 Bavure de sortie (Exit burr)

Les bavures de sortie de pièce sont similaires à celles d'entrée. Cependant, la déformation se crée plutôt dans la direction de l'outil.

Les bavures d'entrée et de sortie se forment surtout sur des matériaux ductiles étant donné qu'elles sont dues à une déformation. Plus le matériau sera ductile, plus la bavure sera grosse.

Ces bavures ne sont pas seulement un bout de matière resté accroché à la pièce, elles font encore partie de la pièce et ont souvent une racine large et peuvent être difficiles à faire disparaître parce qu'il s'agit d'un enlèvement de matière.

3.3.3 Bavure Poisson (Poisson burr)

La bavure Poisson se forme chaque fois que l'arête tranchante de l'outil dépasse le bord de la pièce. Sa formation résulte de l'effort de coupe qui produit une contrainte de compression sur la pièce engendrant un glissement de matière vers l'extérieur de la pièce, donc une bavure Poisson sur l'arête de la pièce. (*Voir Figure 3.9*)

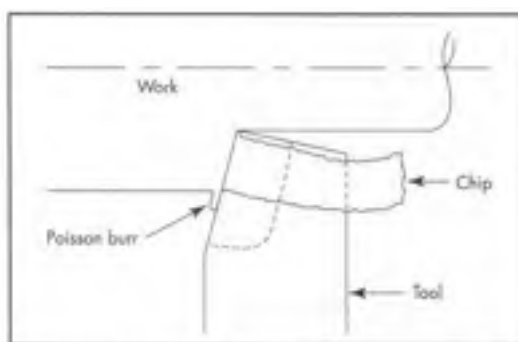


Figure 4-1. Poisson burr formed when cutting edge of tool extends past edge of workpiece.

Figure 3.9 Formation d'une bavure Poisson
Tirée de Gillespie (1999, p.53 [2])

D'après Gillespie [15], les bavures Poisson sont généralement de petites dimensions et dépendent du matériau et des efforts de coupe qui sont appliqués sur la pièce.

3.3.4 Bavure enroulée (Rollover burr)

Les bavures enroulées se forment à la sortie de l'outil de la pièce. Elles se forment lorsque l'effort pour plier le matériau est moindre que pour le couper ou le cisailier. (*Voir Figure 3.10*)

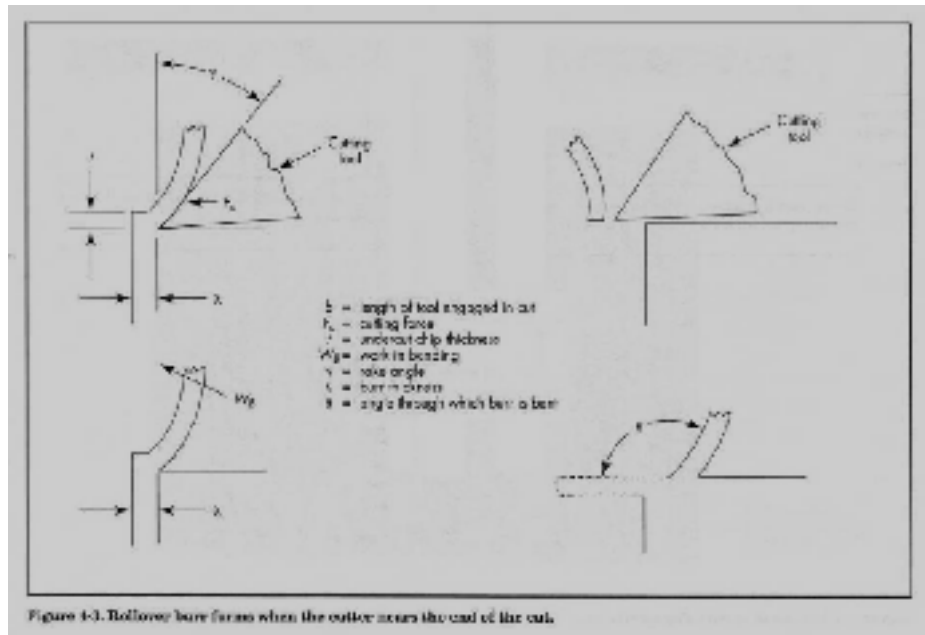


Figure 3.10 Formation d'une bavure enroulée
Tirée de Gillespie (1999, p.55 [2])

Selon Dornfeld [9], elles peuvent être minimisées en diminuant la profondeur de coupe ou en augmentant l'angle de cisaillement à la sortie, c'est-à-dire en s'assurant que l'arête coupante de l'outil sort avec un angle par rapport à l'arête de la pièce. (Voir Figure 3.11)

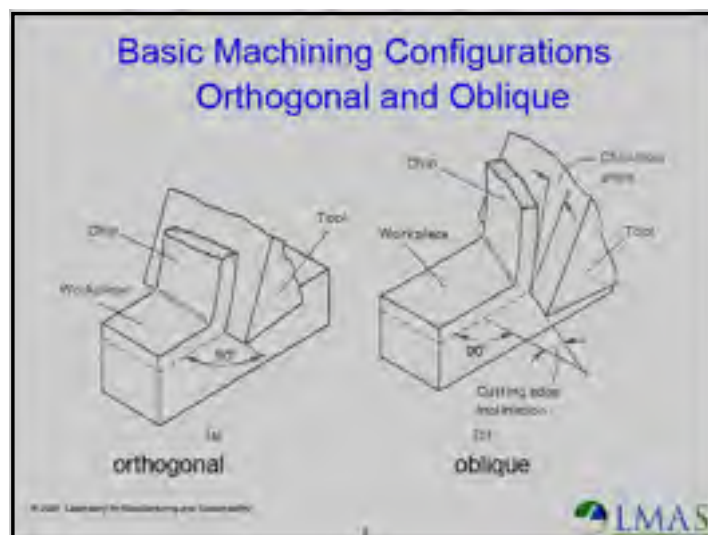


Figure 3.11 Configurations d'usinage
Tirée de Dornfeld (2009, Diapositive 5, présentation 2, [9])

3.3.5 Bavure déchirée (Tear burr)

Les bavures déchirées se forment lorsque le matériau ne se cisaille pas net, mais qu'il se déchire. L'arête formée n'est pas net, mais plutôt irrégulière due aux résidus laissés par le déchirement. (Voir *Figure 3.12*) Par exemple, les pièces poinçonnées ont toujours des bavures déchirées sur leurs arêtes.

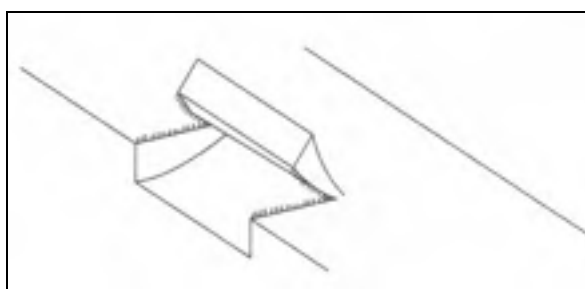


Figure 3.12 Formation d'une bavure déchirée
Adaptée de Gillespie (1999, p.56 [2])

Le type de bavure qui se forme dépend beaucoup de l'opération d'usinage (perçage, fraisage, tournage). Souvent, il se forme plusieurs types de bavure pour une même opération d'usinage.

3.3.6 Cas particuliers du perçage

La formation des bavures dans le cas du perçage est particulière puisqu'il y a un défoncement de la paroi externe avec l'outil. Visuellement, ce phénomène crée une bavure conique en forme de chapeau (voir la première image de la *Figure 3.13*) qui reste attachée en un point à la bavure qui se trouve à la sortie du trou. Cependant, il arrive aussi que la pointe du cône (chapeau) cède et que le chapeau reste attaché au pourtour du trou et déchire par le centre. Le professeur Dornfeld [9] de l'université de Californie présente quatre cas de formation de bavure à la sortie d'un trou. La *Figure 3.13* tirée de sa présentation au séminaire sur la minimisation des bavures qui a eu lieu à l'ÉTS du 11 au 13 août 2009 [9], expose la façon dont se forment ces bavures.

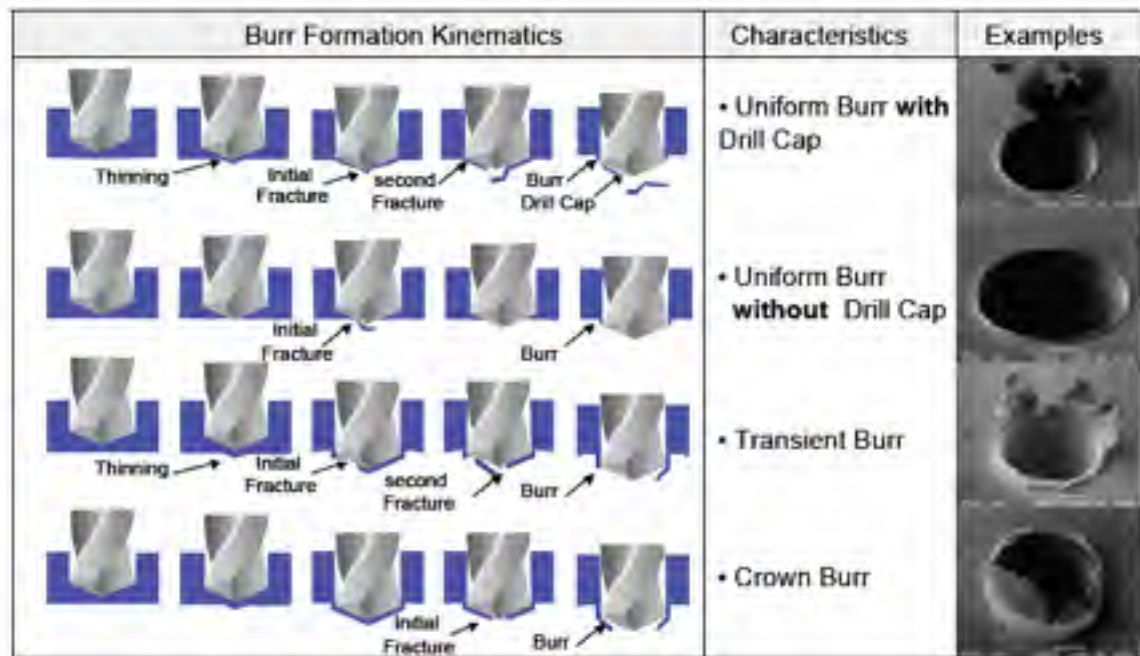


Figure 3.13 Mécanismes de formation des bavures en perçage
Tirée de Dornfeld (2009, Diapo. 38, présentation 3 [9])

Pour revenir à la base, l'usinage d'un trou se fait par perçage dans les cas classiques. L'opération de perçage nécessite beaucoup de force axiale puis tangentielle sur les surfaces du trou, ce qui engendre de la déformation du matériau et crée une bavure Poisson à l'entrée du trou.

En ce qui concerne la sortie du trou, cela dépend de l'affûtage du couteau. S'il est bien affûté, il formera une bavure Poisson, tandis que s'il est moins bien affûté, il aura plutôt tendance à former une bavure enroulée. L'explication est la suivante : un couteau tranchant réussira à couper la bavure, tandis qu'une lame émoussée repliera la bavure sans la couper.

Il existe des méthodes de minimisation des bavures pour bon nombre d'opérations d'usinage dont le perçage. Ces méthodes ont pour but de diminuer la dimension des bavures, de limiter les zones de formation des bavures ainsi que de concentrer la formation des bavures à des régions facilement accessibles.

Dans le cadre du projet, les principales bavures retrouvées sont des bavures Poisson, des bavures enroulées et des bavures caractéristiques du perçage.

3.4 Les différents procédés d'ébavurage

Il existe une grande quantité de procédés d'ébavurage pour différents types d'application. Gillespie [2] en dénombre 122 qui sont divisés en quatre catégories, soit les mécaniques, les électriques, les chimiques et les thermiques. Un bon nombre d'entre eux sont des procédés d'ébavurage de masse, i.e. pour ébavurer une grande quantité de pièce simultanément. Ces procédés sont aussi souvent associés à des opérations de polissage pour uniformiser le fini de surface ou encore former de très petits rayons. Généralement, ils ne sont pas en mesure de faire disparaître de grosses bavures et ce n'est souvent pas souhaité lorsque les pièces baignent dans un média abrasif puisque les bavures qui se décrochent d'une pièce risquent d'endommager les autres pièces. La dureté des matériaux des pièces de moteur d'avion fait en sorte que les procédés d'ébavurage de masse ne sont pas appropriés pour l'ébavurage, mais peuvent servir pour le polissage. De plus, les procédés de masse affectent toute la pièce alors que l'ébavurage est souvent localisé. La *Figure-A II-1* à l'annexe II est une liste des procédés d'ébavurage les plus utilisés selon Gillespie.

3.5 Les outils rigides

Les abrasifs jouent un rôle de premier plan dans le développement des procédés d'ébavurage. Bien que des équipements technologiques soient en cause dans l'automatisation de l'ébavurage, ce sont les abrasifs qui sont en contact avec la matière et qui font l'enlèvement de matière. Il est possible de les diviser en deux catégories : les outils rigides qui permettent un enlèvement de matière considérable en peu de temps et les outils flexibles qui permettent un enlèvement de matière plus faible et plus lent ou de faire du polissage. Évidemment, il n'existe pas une frontière clairement définie qui sépare les deux catégories. Certains outils sont à la limite entre les deux et sont difficiles à catégoriser.

3.5.1 Les abrasifs friables

Il existe une grande variété de meules de toutes formes et dimensions qui servent beaucoup en ébavurage. Elles sont constituées de particules abrasives liées par un autre matériau dans le but de leur donner une forme. Les particules ainsi que le matériau liant peuvent varier de bien des façons dépendamment du matériau à ébavurer. Pour faire la sélection, il faut tout d'abord considérer la possibilité de contamination de la pièce par le liant de l'abrasif ou même la formation d'un plaqué indésirable à la surface de la pièce. Parmi les matériaux de liant disponibles, il y a entre autre des résines, des aluminiums vitrifiés et des caoutchoucs de différentes duretés qui offrent une flexibilité variable. En ce qui concerne le grain abrasif, Gillespie [2] identifie trois facteurs qui influencent la dureté et l'agressivité d'une pierre : la grosseur des particules d'abrasif, le type de liant et la méthode utilisée pour manufacturer les particules abrasives. Des matériaux souvent utilisés comme particules abrasives sont des carbures de silicium, des oxydes d'aluminium et même le diamant. Toujours selon Gillespie [2], trois facteurs influencent l'agressivité des meules abrasives: le liant, le type de grain et la grosseur du grain.

Lors de l'utilisation des meules abrasives, les particules finissent par se détacher ou s'user, puis le liant vient en contact avec la matière et s'use à son tour présentant de nouveaux grains abrasifs neufs. D'après ce principe d'usure, l'outil devrait toujours présenter une surface abrasive quasi-identique, donc toujours offrir la même capacité et la même qualité d'ébavurage.

3.5.2 Les supers abrasifs

Les supers abrasifs ressemblent en apparence aux autres meules abrasives. Cependant, ils ont une durée de vie accrue et une résistance mécanique élevée pour enlever de la matière sur les matériaux les plus durs. La compagnie ABRASIVE TECHNOLOGY a publié un article [22] sur son site web qui explique bien la méthode de fabrication des supers abrasifs P.B.S.[®] et pourquoi ils sont avantageux par rapport à d'autres abrasifs comme les électro-plaqués.

Le procédé d'électro-plaquage consiste à déposer des couches de métal contenant des particules de diamant sur une matrice d'acier. À l'opposé, le P.B.S.[®] consiste à braser des particules de diamant sur une matrice d'acier. La liaison mécanique entre la matrice et les particules de diamant est beaucoup plus grande lors du brasage puisque les matériaux sont fusionnés ensemble. De plus, l'exposition du grain est environ deux fois plus grande pour le P.B.S.[®] puisque la quantité de métal nécessaire pour lier l'abrasif à la matrice est moindre que pour un plaquage comme le démontre la *Figure 3.14*.

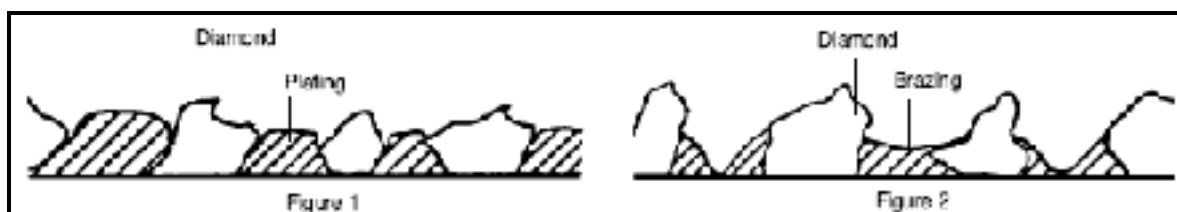


Figure 3.14 Structure de la fabrication de l'électro-plaquage (1) et du P.B.S.[®] (2)
Tirée de Peterman (2004, page 3 [22])

Un facteur important à considérer avec l'utilisation d'abrasif au diamant est qu'il peut se dissoudre dans certains matériaux qui sont demandant en carbone comme l'acier. L'autre élément important est qu'il est aussi disponible des alternatives au diamant comme le CBN (Carbon Boron Nitride ou Nitrure de Boron Cubique) qui ont une dureté inférieure au diamant, mais tout de même très supérieure aux autres matériaux. Par contre, il faut savoir deux choses la première étant que le CBN ne supporte pas la chaleur, donc il ne peut être utilisé à sec et la seconde est que le diamant ne supporte pas les chocs parce qu'il est très fragile. Si ces conditions sont respectées, ces supers abrasifs auront une excellente durée de vie.

3.5.3 Les outils de coupe

Les outils de coupe utilisés pour le fraisage se fabriquent aussi en modèles de très petites dimensions pour des applications plus légères comme l'ébavurage où l'enlèvement de

matière est moindre. Il existe plusieurs types de dentures pour les outils de coupe (*Figure 3.15*).



Figure 3.15 Les types de denture des outils de coupe
Tirée de Gillespie (2003, p.145 [15])

La coupe fine (4^{ème} à partir de la gauche sur la *Figure 3.15*) est plus adaptée pour l'ébavurage étant donné le faible enlèvement de matière. Les dentures fines sont plus faciles à contrôler manuellement justement à cause du fait qu'il y a peu d'enlèvement de matière par dent, donc peu d'effort de coupe. En usinage c'est plutôt le contraire, vu que l'enlèvement de matière est plus grand les fines dentures risquent de bourrer et créer des vibrations. Les dentures hélicoïdales répartissent aussi mieux les efforts de coupe et sont donc recommandées pour l'ébavurage manuel.

3.6 Les outils flexibles

Les outils flexibles sont utilisés pour faire des enlèvements de matière moins importants que les outils rigides. Ils servent souvent aux opérations de finitions et de polissages. Ce type d'outil permet plus ou moins d'imprécision de positionnement pour son utilisation selon s'il est beaucoup ou peu flexible.

3.6.1 Les brosses

Les brosses peuvent servir pour l'ébavurage et le polissage. Elles sont très polyvalentes et disponibles dans de multiples configurations, mais sont généralement d'utilisation axiale ou radiale. La *Figure 3.16* présente les deux configurations de brosses.



Figure 3.16 Brosse à poils hérissés axiale (gauche) et brosse radiale (droite)
Tirées du site internet de 3M™

Étant donné la très grande variété des brosses, il est difficile de faire le choix approprié. Il y a beaucoup de variables à considérer dans le choix d'une brosse, soit : le type de la brosse, le matériel des brins, la longueur et le diamètre des brins, le contact de la brosse (un point, une ligne, une surface), si elle est utilisée avec un liquide de refroidissement ou avec une pâte abrasive, la vitesse de rotation de la brosse et son avance linéaire, la grosseur de la bavure à enlever, l'accessibilité de la bavure ainsi que le matériau de la pièce à ébavurer. En plus de toutes ces variables s'ajoutent des configurations différentes des brins, soit tout simplement droites, ou bien enroulées en spirale, maintenus de différentes façons. Ces configurations ont un effet sur la rigidité de la brosse, donc sur le travail qu'elle peut accomplir. Il y a quelques règles générales dans l'utilisation des différents types de brosses selon Gillespie [14], mais la sélection doit vraiment se faire cas par cas en définissant des besoins détaillés et en conduisant des tests structurés avec quelques produits qui pourraient être utilisable pour l'application spécifique. Gillespie (p.272,[14]) propose un tableau de sélection des brosses fourni par la compagnie Weiler.

L'agressivité des brosses dépend beaucoup du matériau dont elles sont constituées. Il y a des brosses métalliques, d'autres en fibres synthétiques ou naturelles et certaines sont composées d'une matrice de plastique contenant des grains abrasifs. Dans le dernier cas, la grosseur des grains a assurément un effet important sur l'agressivité de la brosse de la même façon qu'il a été discuté dans la section des abrasifs rigides.

D'autre part, la méthode d'utilisation et le taux de pénétration de la brosse a une grande influence sur l'agressivité et la durée de vie de l'abrasif. La *Figure 3.17* montre quelques exemples.

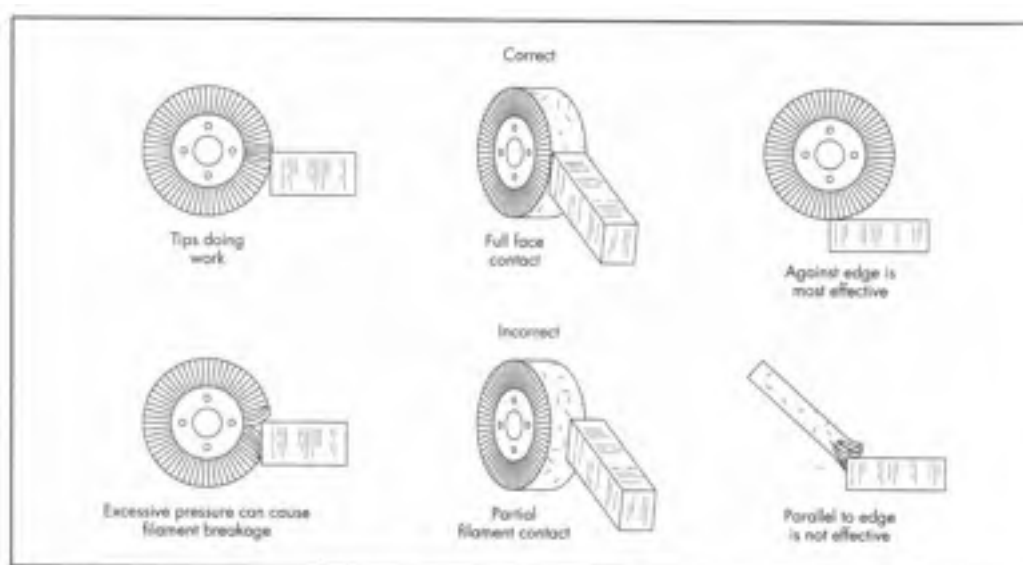


Figure 11-9. Some correct and incorrect brushing techniques for wire brushes.

Figure 3.17 Méthodes d'utilisation des brosses
Tirée de Gillespie (2003, p.270 [15])

Les brosses constituées de filaments en nylon ont une bonne durée de vie, une excellente agressivité et ont beaucoup d'avantages sur les autres matériaux synthétiques. La SME a publié un article de James H. Watts [30] qui explique les facteurs affectant la performance des brosses à mono filament, tout particulièrement les brosses de nylon. La flexibilité des filaments est le facteur le plus important et la température y joue un rôle décisif.

3.6.2 Les mousses

Les mousses, comme les autres abrasifs, sont disponibles dans plusieurs agressivités. Elles servent généralement au polissage, mais peuvent aussi effectuer des tâches légères d'ébavurage. La densité de la mousse est un bon indicateur de son agressivité, plus elle est dense plus elle est agressive. La rapidité d'exécution du travail réalisé par une mousse est aussi fonction de la pénétration de l'outil dans la matière. Par contre, contrairement aux brosses la pénétration se traduit mieux sous forme de pression exercée. La compagnie 3M a développé beaucoup de produits avec la mousse Scotch-Brite™ qui portent le nom commercial de *unitized wheel*. La littérature de la compagnie propose des méthodes de sélection comportant des facteurs à considérer comme le matériau à travailler, le résultat escompté, la dimension de la pièce et l'accessibilité de la zone à ébavurer ou polir.

3.6.3 Les papiers sablés

Les papiers sablés peuvent aussi être intéressants pour des tâches de finition et de polissage. Ils sont disponibles dans une multitude de grosseur de grain permettant soit un gros enlèvement de matière et laissant un fini de surface grossier ou un très léger enlèvement de matière et un fini de surface miroir.

3.7 Le contrôle adaptatif en force

Dans l'ébavurage automatisé, la combinaison du contrôle en position et en force, soit le contrôle hybride, permet de faire du contrôle adaptatif. D'une trajectoire programmée sur un modèle nominal, il est possible de s'adapter aux variabilités provenant des imprécisions mentionnées précédemment. Ceci permet d'élargir les capacités d'applications robotiques à des tâches de précision.

Il est possible de faire des applications de contact avec une force adaptative de différentes manières. Une façon simple pour appliquer une pression constante ou permettre d'adapter

l'utilisation d'outil rigide est de monter l'abrasif sur un outil flexible qui permet un déplacement axial ou radial par le moyen de ressort ou d'amortisseurs pneumatiques (*Figure 3.18*). L'autre façon est d'utiliser un capteur de force électronique et de faire un contrôle logiciel de la force ressentie pour adapter les trajectoires.

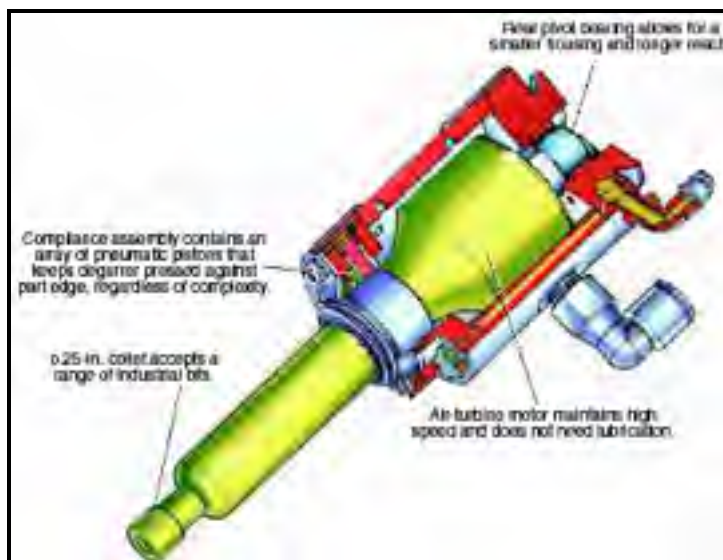


Figure 3.18 Schéma 3D d'un outil à compensation radiale pneumatique
Tirée du site web de *MachineDesign*

L'important dans une boucle de contrôle logiciel est le temps de réponse. La rapidité d'exécution des calculs est un des facteurs les plus critiques dans la faisabilité d'un contrôle de force logiciel. La simplification des calculs et la diminution de la charge des calculs est primordiale. Plusieurs modèles de boucle de contrôle ont été développés au fil des années. Raibert et Craig [23] proposent le modèle classique *Figure 3.19* du contrôle hybride où la force et la position sont contrôlées indépendamment. La boucle du haut contrôle les erreurs de position et de vitesse, puis compense les erreurs par des gains PID. La jacobienne inversée, source d'instabilité lorsqu'il y a présence de termes nuls, est utilisée dans le calcul. La boucle du bas, quant à elle, contrôle les erreurs sur la force. Toutes les erreurs sont combinées pour faire une correction qui se traduit par un couple à commander à chacun des joints du robot.

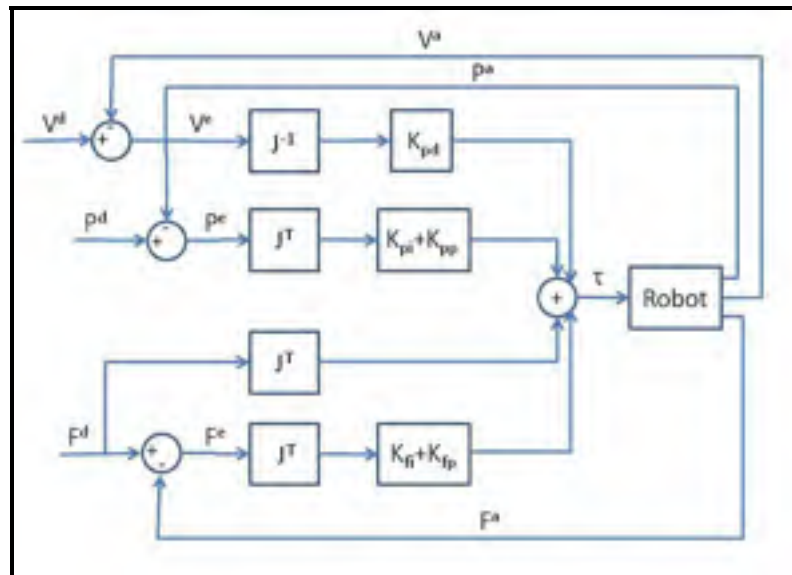


Figure 3.19 Boucle de contrôle hybride simplifiée de Raibert & Craig.

D'autre part, il y a le modèle du '*target tracking*' Figure 3.20 présenté par Kazerounian et Gupta [17] et analysé dans la thèse de M. Giblin [10] qui converti l'erreur de position en une force équivalente à compenser. La boucle du haut contrôle les erreurs de position et de vitesse et les convertis en force à travers une fonction. La boucle du bas contrôle les erreurs sur la force. Toutes les erreurs sont ensuite combinées en une force à commander au robot par l'entremise d'un couple à chacun des axes du robot. Dans toute la boucle de contrôle, la jacobienne inversé n'est jamais utilisée grâce à la fonction qui convertie les erreurs de position et de vitesse en une force à commander. L'absence de la jacobienne inversé favorise la stabilité et accélère les calculs.

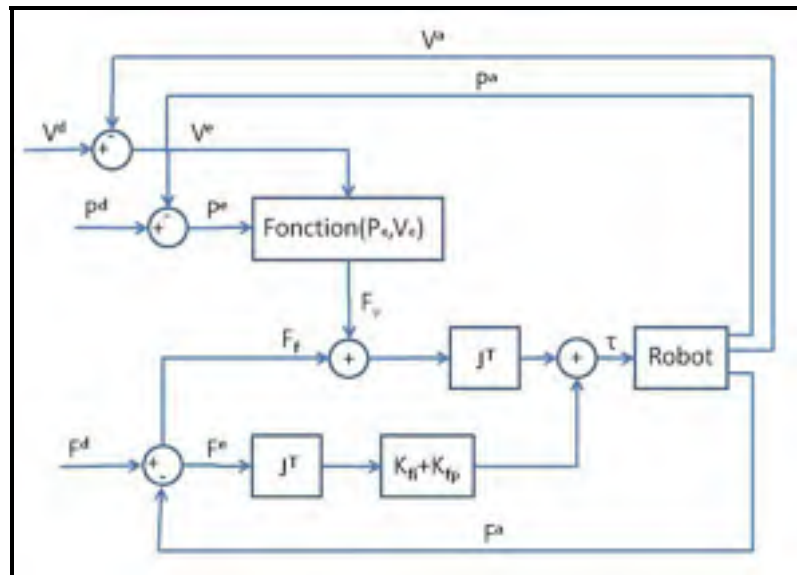


Figure 3.20 Schéma de contrôle simplifié du target tracking par Kazerooni pour un manipulateur série

Peut importe le modèle, l'objectif est de diminuer la quantité de calcul et d'éliminer les instabilités en supprimant le calcul de la matrice jacobienne inversée entre autre.

En outre, il faut aussi définir et optimiser les gains de la boucle de contrôle pour chaque application spécifique, que ce soit de l'ébavurage, du polissage ou de l'assemblage.

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT

Afin de bien attaquer la problématique d'automatisation de l'ébavurage, il est important de procéder par étape pour avoir une vue d'ensemble du problème et en faire une bonne analyse. La première étape consiste à prendre connaissance du produit avec lequel il faut traiter, en l'occurrence des pièces rotatives critiques de moteur d'avion. Dans le même ordre d'idée, étant donné que l'approche de développement se fera par géométrie, il sera primordial de faire une étude exhaustive des particularités des géométries sur chacune des pièces. La seconde étape porte sur l'étude des procédés d'ébavurage actuellement en place puisqu'ils représentent un bon point de départ et sont une source considérable de connaissances. Suite à cette étude, il deviendra plus évident de définir les besoins technologiques pour la robotisation de l'ébavurage et d'élaborer des procédés d'ébavurage automatisables. Puis, viendra le développement des technologies ciblées en parallèle à l'élaboration des procédés. Finalement, lorsque le développement aura atteint un niveau de maturité confiant, l'étape de validation des procédés mènera à l'approbation, puis à la mise en production.

4.1 Familiarisation avec les caractéristiques géométriques des pièces à ébavurer

Une connaissance approfondie du produit avec lequel on doit travailler est sans contredit la source pour effectuer un développement sur ledit produit. Dans le cas présent, l'objectif est d'améliorer l'ébavurage des géométries présentes sur les pièces rotatives de moteurs d'avion. Il convient donc que le point de départ est de prendre connaissance des différentes géométries se retrouvant sur ces pièces, puis d'étudier les caractéristiques de chacune de ces géométries ainsi que de faire une revue des bavures se formant sur chacune des géométries. À titre d'information, trois géométries seront utilisées pour décrire concrètement les trois points d'étude qui suivent. Il s'agit de géométries se retrouvant sur les disques de turbine, soient : les trous, les chambrages et les *toits* tels qu'illustrés à la *Figure 4.1*.

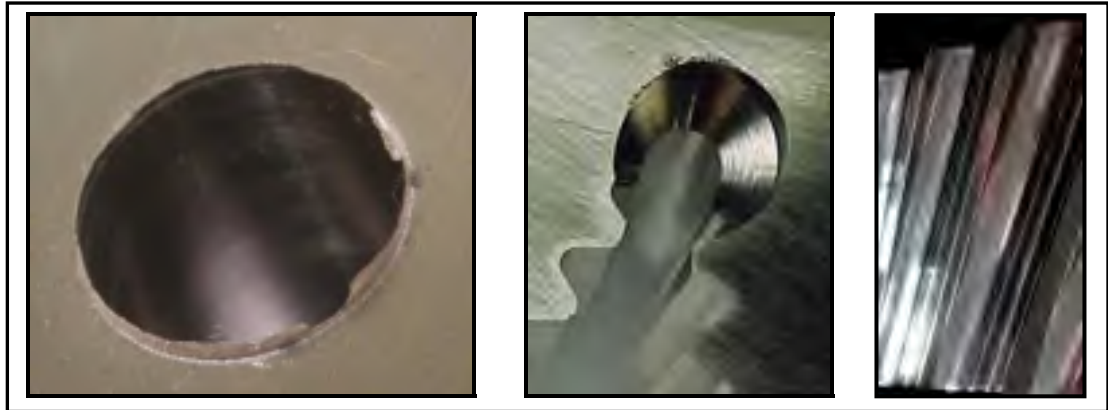


Figure 4.1 Trou, Chambrage et Toit

4.1.1 Études des pièces et des géométries

Tout d'abord, il faut présenter les pièces ciblées pour le développement. En l'occurrence, il s'agit de pièces rotatives critiques de la zone de compression et de combustion du moteur, les compresseurs et les turbines. Les trois géométries à l'étude font parties des turbines. Un facteur important à considérer est le matériau puisqu'il a une influence directe sur l'usinabilité. Salmon et *al.* [26] affirment que dans le domaine aéronautique, les pièces de turbines d'avion sont composées d'un super alliage à base de nickel. L'usinabilité de ces alliages est environ dix fois moins grande qu'un acier doux, donc son usinage est difficile et il en va de même pour son ébavurage.

Maintenant, les pièces et le matériau sont connus. Pour obtenir un portrait global du produit cible, il est nécessaire de dresser une liste exhaustive des pièces fabriquées et de répertorier les géométries se retrouvant sur chacune d'elles.

Ensuite, il faut déterminer les priorités à attaquer parmi les géométries. Les priorités se définissent selon plusieurs critères. En premier lieu, le volume de production est un critère qui pèse dans la balance puisque même un petit problème réglé sur un gros volume de pièce peut apporter un avantage considérable. En second lieu, la non qualité est souvent la source de grand problème. Régler des problèmes de qualité peut permettre des gains colossaux en énergie, en temps et en argent. En dernier lieu, un critère à considérer qui n'est pas sans

importance, mais qui dépend de la philosophie de chaque entreprise, est celui de la santé et sécurité au travail. Fort heureusement, dans notre société la santé et la sécurité au travail prend de plus en plus de place, surtout dans les grandes entreprises.

Dans le cas présent, le développement des géométries a été priorisé par les problèmes de santé et sécurité, puis par ceux de qualité. Dans le cas des problèmes de qualité, le volume de production a aussi servi comme critère pour atteindre la proportion respectable de 80%-20%.

4.1.2 Études des caractéristiques des géométries

Une fois que les géométries ont été priorisées, il faut les étudier plus en détail pour définir les configurations qu'elles peuvent prendre et les caractéristiques propres à chacune des configurations qui apportent de la variabilité et un défi de robustesse dans le développement des procédés. Voici l'étude des trois géométries ciblées en commençant par les *toits*.

LES TOITS

Les *toits* sont le résultat d'une opération de brochage d'une rainure. Ils correspondent à l'arête à l'intersection de deux rainures. Tel que présenté à la *Figure 4.2*, le cas (1) le plus fréquent est une arête simple et continue qui forme un sommet peu pointu. L'autre cas (2) est plus complexe. Il s'agit parfois d'une arête qui se sépare en deux arêtes distinctes pour former une sorte de dent ou un crochet (*Figure 4.1*). D'autres fois, il s'agit d'une arête simple comme pour le cas 1, mais le sommet est très pointu. Les deux cas sont présentés à la *Figure 4.2* pour les configurations avec une arête simple.

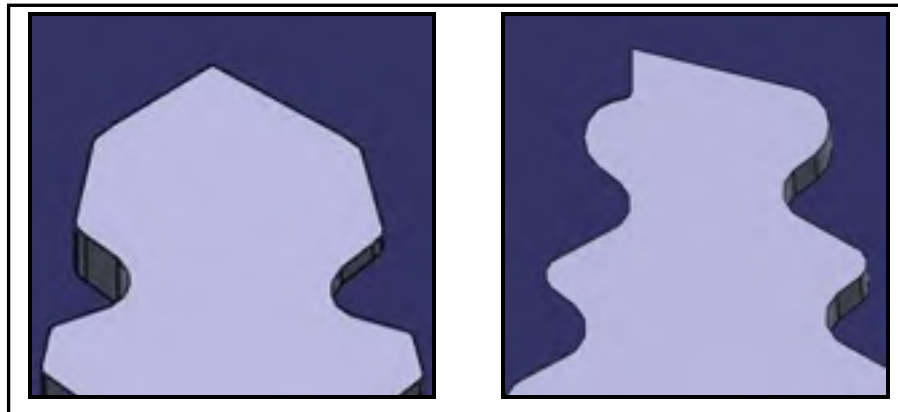


Figure 4.2 Toit, cas 1(sommet peu pointu) et cas 2 (crochet)

Étant donné que les *toits* se retrouvent sur le pourtour de la pièce et sur le plus grand diamètre, leur accessibilité ne peut être meilleure. Sa géométrie étant linéaire, son niveau de complexité est très faible.

LES CHAMBRAGES

Les chambrages sont usinés aux extrémités de chaque rainure mentionnée dans la section des *toits*. Ils ont une fonctionnalité pour l'assemblage des ailettes sur les turbines. On les retrouve fréquemment dans deux configurations, mais une troisième configuration moins fréquente est tout de même problématique :

- Chambrage simple,
- Chambrage avec rainure,
- Chambrage avec plats.

La *Figure 4.3* illustre un dessin de chacune des configurations des chambrages.

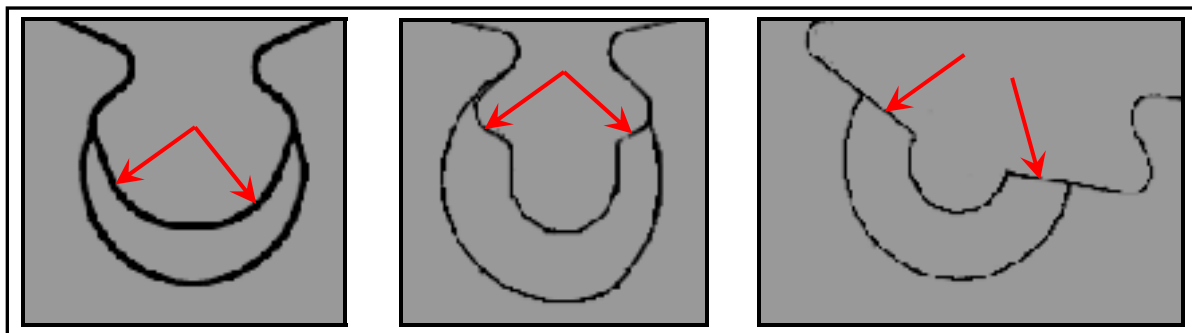


Figure 4.3 Configuration de chambrage : (1) simple, (2) avec rainure et (3) avec plats

Outre la configuration, la caractéristique qui a de l'influence est l'angle du chambrage. Les rainures sont usinées en angle par rapport à la surface de référence qu'elles traversent et les chambrages sont usinés dans le même angle que les rainures. On verra l'influence de l'angle des chambrages dans la section sur l'étude des bavures.

Comme dans le cas des *toits*, les chambrages ont aussi une très bonne accessibilité. Par contre, la zone d'ébavurage est très confinée, c'est-à-dire que l'espace est restreint et que les surfaces adjacentes sont très critiques. Ces surfaces doivent être polies finement de façon uniforme et sans égratignure.

LES TROUS

Les trous peuvent paraître simples à première vue, mais en réalité ils peuvent prendre une infinité de configurations les plus complexes les unes que les autres. La très grande variabilité qu'ils peuvent prendre les rends difficiles à regrouper et complexifie d'une part leur ébavurage et d'autre part le développement de procédés génériques d'ébavurage.

Prenons pour débiter un cas simple, un trou percé à travers un plan. Il est très simple, avec l'aide d'un outil à chanfreiner, de venir exécuter, dans l'axe du trou, un chanfrein uniforme sur tout son pourtour comme on peut le voir à la *Figure 4.4*.

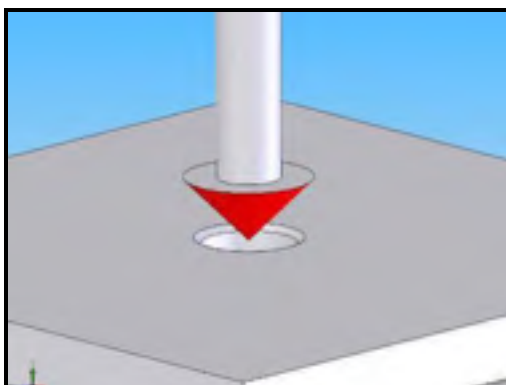


Figure 4.4 Chanfreinage d'un trou sur un plan à l'aide d'un outil à chanfreiner

Par contre, des pièces rotatives sont composées davantage de surfaces cylindriques que de surfaces planes. Les trous peuvent aussi être percés à travers des surfaces complexes, voire multiples. De plus, les trous ne sont pas nécessairement percés dans un axe normal à la surface, ils sont parfois en angle. La *Figure 4.5* illustre trois différentes configurations que peuvent prendre les trous.



Figure 4.5 Configurations des trous (1) à travers un cylindre, (2) à travers des surfaces multiples et (3) à travers des surfaces complexes

Chaque configuration apporte ses problématiques propres qui sont reliées tout simplement à la forme que peuvent prendre les arêtes des extrémités des trous.

Tout d'abord, il y a les trous percés au travers d'une surface cylindrique dont l'axe du trou est normal à cette même surface. En regardant de près, il est possible de remarquer d'une part que le trou est percé sur une portion d'arc de cercle de la surface cylindre. D'autre part, on

remarque que l'arête forme une sorte de scelle de cheval. Or, si l'on veut chanfreiner ce trou avec un outil à chanfreiner dans l'axe du trou, il apparaît alors que l'outil n'entre pas en contact avec toute l'arête en même temps. Il touchera deux extrémités opposées en même temps, puis plongera dans la matière avant de toucher progressivement au reste de l'arête. Ceci veut donc dire qu'il n'est pas possible de cette façon d'obtenir un chanfrein uniforme sur tout le pourtour du trou comme on peut le voir sur la *Figure 4.6*.

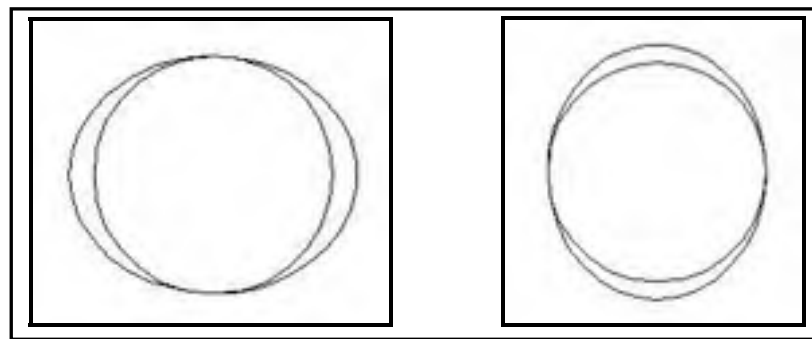


Figure 4.6 Chanfrein d'un trou sur une surface (1) concave et (2) convexe

La variabilité dimensionnelle (Δ) se calcul géométriquement comme l'illustre la *Figure 4.7*. À partir de ce calcul et des requis dimensionnels d'ébavurage, un delta critique peut être défini comme un standard à respecter et les cas qui ne respectent pas ce standard sont classés comme n'étant pas réalisable avec cette méthode d'ébavurage. À priori, définir un ratio D/d (D : diamètre du cylindre, d : diamètre du trou) comme seuil critique semble une excellente référence. Malheureusement, pour un même ratio Δ varie lorsque D varie.

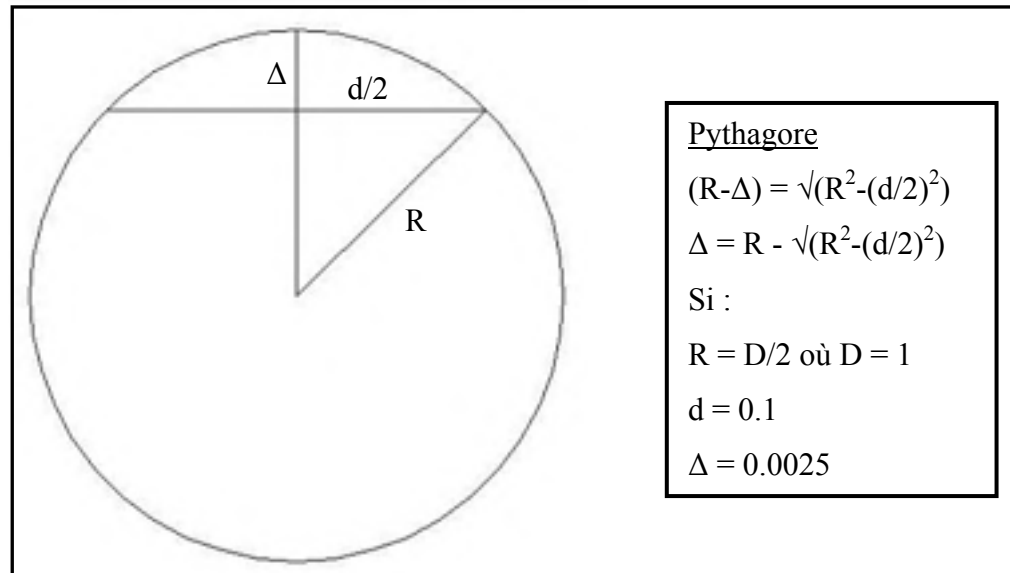


Figure 4.7 Calcul du Δ du chanfrein d'un trou sur une surface cylindrique

Les trous percés à travers des surfaces multiples (*Figure 4.5*) ne peuvent évidemment pas être chanfreinés par l'usage d'un outil à chanfreiner dans l'axe du trou.

En fin de compte, les trous à angle percés à travers des surfaces complexes peuvent donner des formes d'arête de tous genres. À la base, un trou percé à angle à travers un plan forme une arête elliptique. Par contre, lorsque la surface est cylindrique, l'arête sera aussi elliptique, mais incurvée à la fois. On pourrait aussi se retrouver avec un genre de scelle de cheval elliptique complexe (*Figure 4.8*).

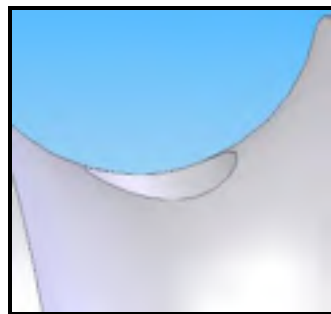


Figure 4.8 Trou percé à travers une surface complexe

Finalement, l'accessibilité et le confinement sont des critères qui sont aussi importants puisqu'il est parfois très difficile d'accéder à des zones d'une pièce, en particulier à l'intérieur de celle-ci. La *Figure 4.9* illustre un cas facile et un autre plus difficile.

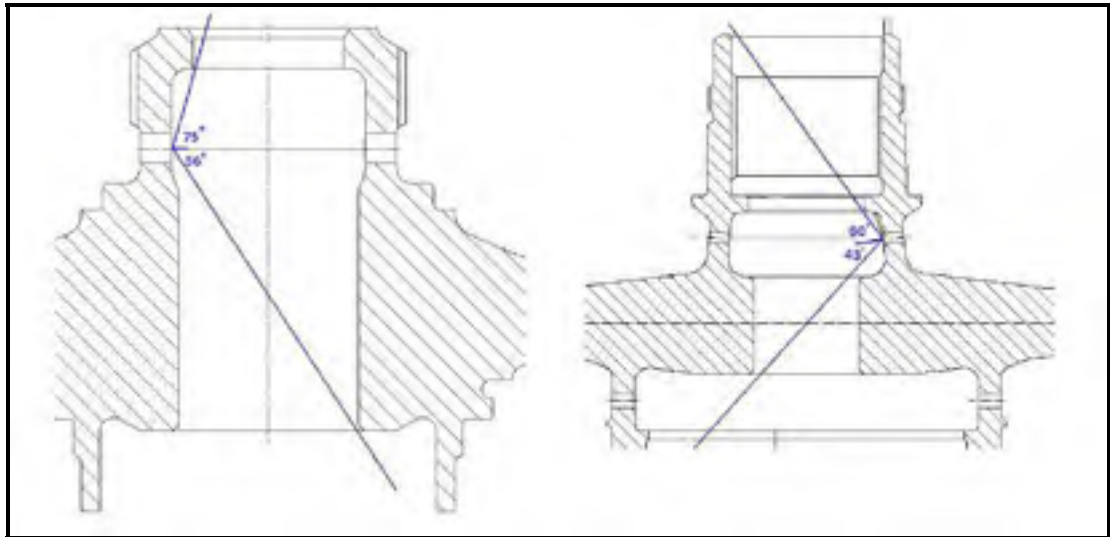


Figure 4.9 Accessibilité et confinement facile (image gauche) et difficile (image droite)

4.1.3 Étude des bavures

Les géométries des pièces ont d'abord été regroupées par configuration dans le but de développer des procédés d'égavurage génériques. Il est parfois possible de regrouper plusieurs configurations pour développer un seul procédé d'égavurage. Cependant, un facteur important à considérer est la bavure formée sur la géométrie. Bien entendu, le type de bavure formée est directement lié à la configuration de la géométrie. Certaines bavures sont plus sévères que d'autres, c'est-à-dire qu'elles sont plus difficiles à enlever. Une seule méthode développée pourra parfois permettre d'égavurer les différentes configurations d'une même géométrie. Par contre, les abrasifs ou les paramètres d'égavurage changeront pour assurer la robustesse du procédé.

Avant d'étudier les trois géométries en particulier, il faut mentionner deux facteurs importants dans la formation des bavures : le support de matière dont l'outil de coupe dispose

et l'angle avec lequel l'arête coupante de l'outil sort de la matière. Pour un même matériau, Dornfeld [9] présente ces deux facteurs comme ayant une grande corrélation avec la formation des bavures. Ces deux facteurs seront analysés pour les trois géométries : *toits*, *chambrages* et *trous*.

LES TOITS

Comme il a été mentionné précédemment, les *toits* sont le résultat de l'usinage d'une rainure. Ces rainures sont formées selon le procédé de brochage. Les *toits* sont donc les arêtes latérales parallèles à la direction de coupe de l'outil. Le support latéral de matière qu'offre la pièce est déterminant sur le résultat de bavure obtenu. Plus l'angle entre les surfaces formées est grand, plus le support est bon et vice versa. La *Figure 4.2* montre les deux cas. Dans le premier cas (image gauche) le support est bon et la bavure pratiquement inexistante. Dans le second cas (image droite), c'est la situation inverse. L'angle entre les deux faces est petit, donc le support est moindre. La bavure observée est une bavure Poisson sévère.

LES CHAMBRAGES

Le cas des *chambrages* ne suppose pas un défoncement de la matière comme les cas de perçage présentés à la section 3. Le support de matière n'a pas la même influence pour les *chambrages*. C'est plutôt l'angle avec lequel l'arête tranchante de l'outil sort de la matière qui a une influence marquée pour les *chambrages*. Dans le premier cas, l'arête de l'outil sort avec un angle de la matière et on constate que la bavure Poisson formée est très légère. Par contre, dans le deuxième et le troisième cas l'arête tranchante de l'outil sort parallèlement à l'arête de matière (voir *Figure 3.11*). Les efforts de coupe sont moins répartis et il se forme une bavure enroulée beaucoup plus sévère que la bavure Poisson du premier cas. Les bavures des trois cas sont présentées dans l'ordre à la *Figure 4.10*.

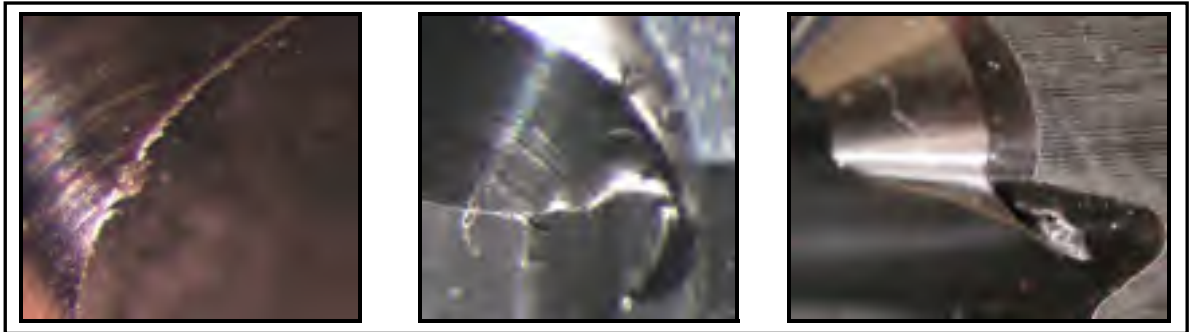


Figure 4.10 Bavures des trois types de chambrage (simple, avec rainure et avec plat)

LES TROUS

Tel que mentionné précédemment, les trous se présentent dans une multitude de configurations. Il est à rappeler qu'avec un couteau bien affûté il se formera une bavure Poisson autant à l'entrée du trou qu'à la sortie. Par contre, la bavure sera minime à l'entrée et sévère à la sortie. Le défoncement de la matière à la sortie demande beaucoup d'effort de coupe et le glissement de matière caractéristique des bavures Poisson sera plus prononcé.

Dans un autre ordre d'idée, le support de matière offert par la pièce joue un rôle important dans la formation des bavures lors du perçage. Les trous percés en angle par rapport à la surface qu'ils traversent ne forment pas une bavure uniforme sur le pourtour du trou. La bavure est plus prononcée où le support de matière est moindre comme le montre la *Figure 4.11*.

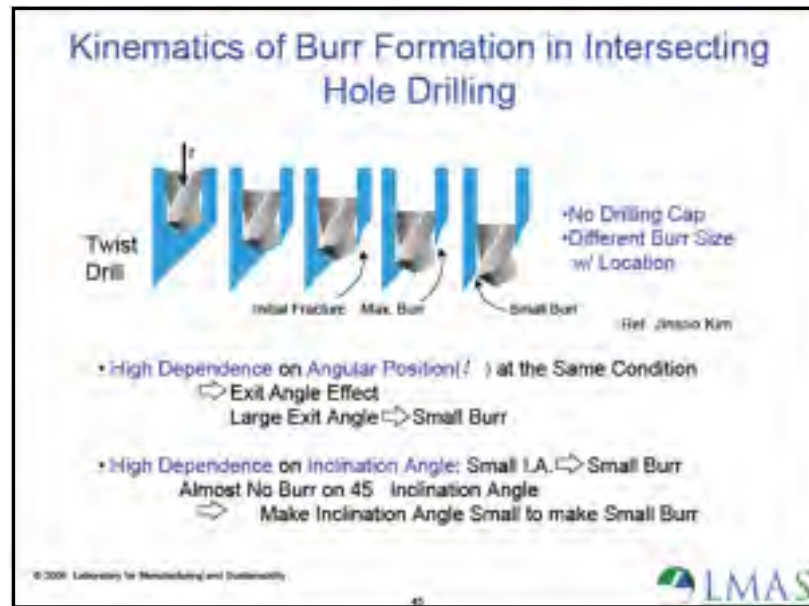


Figure 4.11 Formation des bavures de perçage pour les trous angulés
Tirée de Dornfeld (2010 [9])

Finalement, il y a le cas des trous de petite dimension. Il se forme souvent des bavures avec chapeau (premier cas de la *Figure 3.13*) sur les petits trous parce que l'effort nécessaire pour replier la bavure est moins grand que l'effort pour la fracturer.

En bref, on constate que certains facteurs sont aggravants dans la formation des bavures comme la configuration des géométries et les parcours d'outil voire même leur conception. Avant de s'attaquer au développement de nouvelles méthodes d'ébavurage, le premier point à aborder est la minimisation des bavures à l'étape de l'usinage pour faciliter l'ébavurage. Comme la configuration des géométries de la pièce a une grande influence, il faut déterminer avec les concepteurs du produit si cette configuration peut être modifiée pour la fabrication. Par contre, dans le domaine aéronautique, les efforts et les coûts pour modifier un produit existant sont très élevés à cause des normes de transport à respecter. Si la configuration est nécessaire, les parcours d'outil ainsi que la conception des outils peuvent être adaptés de sorte à diminuer les bavures. Mais avant de concevoir des outils sur mesure, il est primordial de travailler sur l'optimisation des paramètres d'usinage pour limiter ou minimiser la formation des bavures. De plus, les parcours d'outil peuvent parfois difficilement être

modifiés comme pour le perçage. Pour terminer, le dernier facteur à considérer dans la formation des bavures est l'usure d'outil. Il vaut parfois mieux faire affûter un outil plus souvent pour éviter des problèmes dans les étapes subséquentes d'ébavurage. Un outil désaffûté produit des bavures plus sévères.

La liste suivant énumère quelques moyens de minimiser la formation des bavures :

1. Un concept de produit en fonction de la fabrication,
2. Des parcours d'outil qui minimise la formation des bavures,
3. Des parcours d'outil qui localise les bavures à des endroits faciles d'accès,
4. Des outils bien affûtés,
5. Des paramètres de coupe optimisés pour la minimisation des bavures,
6. Une sélection d'outils qui optimise chaque condition de coupe particulière.

4.2 Étude des procédés actuels d'ébavurage

Maintenant que le produit est bien présenté, les géométries identifiées et les bavures étudiées, il faut se pourvoir de connaissances pratiques sur l'ébavurage, les procédés et les abrasifs. Cette étude s'effectue en trois étapes en commençant par une revue des instructions de travail, suivi par l'analyse des procédés d'ébavurage et se termine par l'observation des procédures d'inspection.

La première étape consiste donc à étudier la chronologie des opérations d'ébavurage et d'analyser le rôle de chacune. Les instructions de travail permettent d'acquérir beaucoup d'information quant au requis dimensionnels et de fini de surface ainsi que sur les outils qui doivent être utilisés pour faire l'ébavurage. Par contre, les discussions avec les mécaniciens de banc qui effectuent la tâche d'ébavurage permet d'en connaître beaucoup plus sur ce que peut apporter l'expérience. Les mécaniciens de banc peuvent expliquer l'utilisation des abrasifs, l'effet des paramètres d'utilisation sur le résultat d'ébavurage et sur l'usure de

l'outil, les raisons de la chronologie des opérations d'ébavurage ainsi qu'une foule de détails techniques qu'une instruction de travail ne révèle pas.

À la seconde étape, ce qu'on apprend sans surprise en étudiant les procédés est que les abrasifs rigides servent à enlever les bavures et à former un chanfrein. Dans le même ordre d'idée, les abrasifs flexibles servent plutôt à enlever les bavures secondaires et à polir les surfaces. De plus, les outils rigides permettent, de façon générale, d'enlever la bavure et de former un chanfrein dans la même opération. Les abrasifs flexibles permettent eux aussi d'effectuer plus d'une étape à la fois, soit enlever les bavures secondaires et polir les surfaces. Bien entendu, les abrasifs flexibles ont la capacité d'enlever les bavures et de former des chanfreins ou des rayons, mais le temps d'ébavurage sera beaucoup plus long. La *Figure 4.12* présente les deux types d'outil.

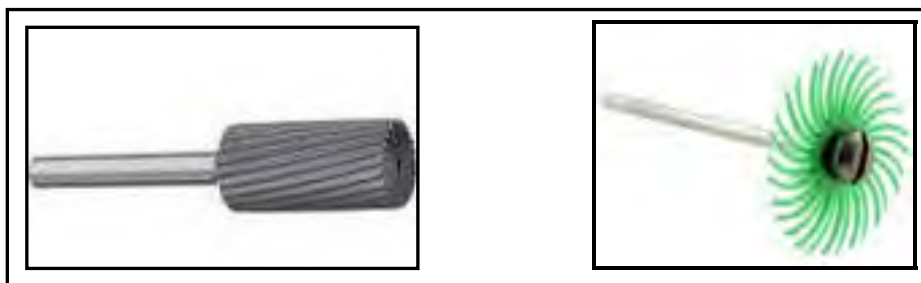


Figure 4.12 Outil rigide à gauche et outil souple à droite

En outre, l'expérience d'utilisation des outils rigides rotatifs permet d'apprendre qu'il est difficile de contrôler manuellement un outil de coupe qui a peu de flute ou un abrasif qui n'est pas usé de façon à rendre sa surface uniforme. Par ailleurs, l'utilisation manuelle d'outil rigide se contrôle mieux à une vitesse de rotation élevée comme 50000 tour/min. À faible révolution, les outils ont tendance à rebondir, donc à vibrer et ils sont alors difficiles à contrôler manuellement. Ces connaissances seront utiles pour le développement du contrôle de force puisque son utilisation est basée sur la reproduction du travail manuel. Le *Tableau 4.1* est un tableau comparatif des avantages et désavantages des outils rigides et flexibles.

Tableau 4.1 Comparaison des avantages et désavantages des outils rigides et flexibles

OUTILS RIGIDES	
AVANTAGES	DÉSAVANTAGES
<ul style="list-style-type: none"> ✚ Enlèvent beaucoup de matière ✚ Travaillent rapidement ✚ Ont une durée de vie accrue ✚ Offrent des résultats robustes ✚ Conservent leurs formes et dimensions longtemps 	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Enlèvent parfois trop de matière ✚ Créent des bavures secondaires ✚ Vibrent beaucoup ✚ Ne permettent pas l'erreur
OUTILS FLEXIBLES	
AVANTAGES	DÉSAVANTAGES
<ul style="list-style-type: none"> ✚ Forment un chanfrein exempt de bavure ✚ Polissent les surfaces ✚ Permettent l'erreur ✚ Peuvent effectuer des travaux minutieux 	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Sont friables ✚ Travaillent lentement ✚ Ont généralement une courte vie ✚ Changent de forme et de dimension rapidement

La troisième et dernière étape consiste à examiner les procédures d'inspection. Cette étape permet de connaître les standards établis pour l'inspection. Par exemple, lorsqu'on demande qu'une arête soit exempte de bavure, cela signifie que l'arête ne doit pas être accrochante pour l'ongle et qu'on ne doit pas voir de bavure à un grossissement de 10 fois. Ces exigences peuvent varier d'une compagnie à une autre et d'un produit à un autre. L'important est d'avoir un standard, qu'il soit quantitatif ou qualitatif, mais qu'il soit le même pour chaque inspecteur. Les opérations d'inspection permettent aussi de connaître les techniques et technologies d'inspection utilisées pour vérifier que les pièces rencontrent les requis spécifiés dans les instructions de travail. Finalement, les inspecteurs qualité peuvent nous aider à se faire une expérience visuelle de référence sur ce qui est accepté et ce qui est rejeté. Cela permet aussi de comprendre pourquoi certaines pièces sont rejetées, donc de travailler sur ces

problématiques lors de l'élaboration des procédés d'ébavurage afin d'éliminer ces problèmes de mauvaise qualité.

4.3 Définition des besoins technologiques pour la robotisation

Les objectifs principaux du projet sont, tout d'abord, de développer des procédés d'ébavurage qui doivent être robustes et répétables tel que défini au chapitre 2. Par la suite, l'objectif spécifique est de simplifier les procédures pour accélérer la réalisation du projet en développant des procédés qui soient génériques pour qu'ils puissent être transférables et englober le plus grand nombre de pièces possibles. Finalement, en considérant la diversité des pièces ciblées, le choix d'une technologie polyvalente s'impose pour rencontrer ces objectifs, soit la robotisation du procédé qui sera présentée au chapitre 5. D'après ce choix, le dernier objectif devient donc de démontrer la faisabilité de robotiser toutes les opérations d'ébavurage allant de l'enlèvement de matière jusqu'au polissage.

Ceux qui connaissent les capacités actuelles de précision des robots savent qu'il est nécessaire, pour effectuer une tâche de précision comme l'ébavurage de pièces rotatives aéronautiques critiques, de mettre en place un moyen de s'assurer que le résultat soit bon dans une proportion respectable. Il existe deux moyens qui, à priori, ont la capacité de livrer un produit conforme.

Le premier moyen est itératif et consiste à exécuter une opération d'ébavurage, puis à inspecter le résultat et prendre une décision à savoir si le résultat est bon ou si une autre opération est nécessaire. Dans la réalité, lorsque l'ébavurage est fait manuellement, c'est exactement ce processus itératif qui est utilisé. Il est possible de développer un algorithme décisionnel intelligent qui puisse évaluer la situation et faire des choix quant aux opérations du procédé qu'il est nécessaire d'exécuter. Cependant, pour être en mesure de prendre une décision, il est nécessaire de connaître l'état quantifié de la géométrie à ébavurer. Actuellement, les technologies d'inspection (caméra et laser) qui ont le potentiel de recueillir cet information ne sont pas complètement automatisables, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas en

mesure de quantifier adéquatement l'état de la géométrie ou que leur utilisation n'est pas stable ou suffisamment fiable pour être utilisées sans intervention humaine. Parfois, ce sont les géométries qui sont difficilement accessibles pour l'inspection. Ce moyen de livrer un produit conforme est un excellent objectif à long terme pour automatiser complètement l'ébavurage et son inspection. Par contre, le volet d'inspection est un projet à part entière et est traité indépendamment du développement des procédés d'ébavurage.

Le second moyen consiste à développer des procédés d'ébavurage qui sont robustes grâce aux abrasifs, aux outils et aux paramètres plutôt que grâce à un contrôle d'inspection. La philosophie de cette méthode est de contrôler l'environnement pour obtenir un résultat répétable et de développer un procédé robuste plutôt que de contrôler le résultat et d'adapter le procédé en cours de route.

Dans le cadre du projet, le choix s'est arrêté sur le second moyen de développement. Bien entendu, pour pouvoir appliquer cette philosophie, il faut que l'intrant, i.e. une géométrie comportant une bavure, induise peu de variabilité, ce qui dans le cas présent est une réalisation déjà bien accomplie. Comme il a été dit précédemment, ce qui importe dans cette approche est de contrôler l'environnement et de s'adapter aux variabilités inéluctables décrits au chapitre 3 de façon à obtenir un résultat acceptable et répétable. La première étape consiste à faire un montage de pièce répétable. Étant donné que les pièces sont rotatives, il faut définir un point de départ, donc indexer la pièce dans une orientation spécifique. Les méthodes mécaniques qui impliquent l'utilisation d'un gabarit pour positionner la pièce sont pratiques lorsqu'on a une pièce en beaucoup d'exemplaires. Le cas présent est différent, c'est-à-dire qu'il y a une grande diversité de pièce. Il faut donc une solution polyvalente. Deux solutions semblent prometteuses, la première est d'utiliser un palpeur comme en usinage, l'autre est d'utiliser une caméra de vision pour faire la détection des géométries et orienter la pièce au bon endroit. La deuxième étape consiste à développer des procédés qui soient robustes. L'objectif est donc de sélectionner des outils et des paramètres de procédé qui permettent un enlèvement de matière rapide et efficace dans les cas les plus sévères. Seuls les outils rigides ont la capacité de remplir cet objectif. Par contre,

les outils rigides demandent une précision de positionnement accrue. Ils ne s'adaptent pas aux variabilités discutées au chapitre 3. Il faut donc introduire une technologie qui permettra au robot de s'adapter à ces variabilités, donc de permettre l'utilisation d'outils rigides. Cette fois, plusieurs solutions sont disponibles. Une première est mécanique et consiste à monter l'outil sur un système ressort amortisseur qui lui permettra de s'adapter aux variabilités des contours à suivre. Dans ce cas, c'est l'outil qui s'adapte. Une seconde solution est logicielle et utilise un capteur de force électronique à 6 DDL monté au bout du robot ou des capteurs de couple aux joints. Cette fois, c'est le robot qui s'adapte au contour en appliquant une force constante et non l'outil.

La dernière étape en est une de calibration. Il est très important de bien calibrer les TCP d'outil. Lorsqu'il s'agit d'inspection, la position relative de l'outil par rapport à la pièce ne nécessite pas une précision accrue. Par contre, lorsqu'il s'agit de localiser une géométrie avec un instrument et de réaliser une tâche d'ébavurage avec un autre par exemple, la relation entre la position trouvée de la géométrie par l'instrument de localisation et la position à laquelle l'outil de travail se rendra est très importante. La robustesse de la méthode de calibration des TCP devient cruciale puisque la répétabilité de la valeur des TCP a une incidence directe sur la relation entre les TCP des différents outils. L'automatisation de la méthode de calibration permettra d'obtenir la répétabilité des valeurs de TCP.

Les besoins technologiques étant maintenant définis, l'élaboration des procédés d'ébavurage peut et doit se faire en parallèle avec le développement des technologies.

4.4 Élaboration des procédés d'ébavurage robotisés

Le développement des procédés d'ébavurage s'échelonne sur plusieurs niveaux de maturité d'évolution allant de l'étude de faisabilité jusqu'à la mise en production. Tout d'abord, la sélection des abrasifs se fait suivant la logique chronologique d'ébavurage, c'est-à-dire les quatre étapes d'ébavurage suivantes :

1. Enlever la bavure,
2. Former l'arête par un chanfrein ou un rayon,
3. Enlever les bavures secondaires laissées par la formation de l'arête, et
4. Polir les surfaces.

Ensuite, les paramètres du procédé sont définis par des tests manuels, puis une première validation des résultats est faite. Ce processus est itératif, mais lorsqu'un résultat est acceptable, la robotisation de la recette peut commencer. Encore une fois, ce processus peut être itératif. Si la recette a été définie d'après une connaissance approfondie des capacités technologiques de la cellule robotisée, le processus itératif devrait uniquement se faire sur les paramètres du procédé et non sur l'outillage. Une fois que le procédé est stable, une nouvelle validation des résultats doit être faite avec les inspecteurs qualité. Si la validation est favorable, le procédé peut être soumis à des tests de robustesse et de répétabilité dont la conclusion positive mènera aux étapes d'approbation des procédés et à la mise en production.

L'évolution des étapes de développement des procédés décrit précédemment est présentée pour les trois géométries introduites dans la section 4.1.2, soit : les *toits*, les *chambrages* et les *trous*.

TOITS

Comme il a été expliqué précédemment, le contexte de priorisation des *toits* est celui de la santé et de la sécurité. Une seule configuration de *toit* est problématique, donc un seul procédé est en cause. Il faut développer un procédé de remplacement. Étant donné que les délais sont courts, il faut trouver une solution avec les équipements déjà en place. La solution robotique est la plus appropriée parmi les équipements disponibles. Par contre, la cellule robotique d'ébavurage actuelle ne dispose pas des nouvelles technologies intégrées sur la cellule prototype de développement. Pour accélérer le processus de mise en production d'un nouveau procédé de remplacement, aucun équipement ou abrasif ne sera ajouté à la cellule robotique actuellement en fonction. Cette cellule est donc munie d'un palpeur par contact,

d'un moteur pouvant entrainer des outils rotatifs, d'un mandrin rotatif pour maintenir les pièces (ce mandrin ne permet pas d'indexer), et d'une quantité limitée d'abrasif dont la plupart sont flexibles.

L'analyse du procédé actuel a permis d'apprendre que, pour enlever la bavure, il faut prendre l'arête de front comme dans la *Figure 4.13*. Si on attaque de dos, la bavure se plie sur la face et devient encore plus difficile à enlever ensuite. D'autre part, on sait que la pièce est mise en rotation lors de l'ébavurage. Ceci permet d'obtenir un résultat uniforme sur tous les *toits* de la pièce. Cette approche sera utilisée sur le robot de production grâce au mandrin rotatif. Par contre, les abrasifs utilisés pour le procédé actuel sont très périssables, donc difficile d'utilisation avec un robot, c'est pourquoi ils ne sont d'ailleurs pas disponibles sur le robot de production.

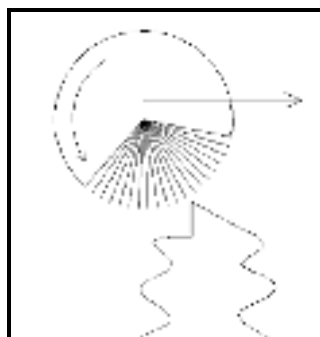


Figure 4.13 Brossage de front d'un toit

Les abrasifs disponibles sont des brosses et des mousses du type unifié (voir *Figure 4.14*). Les brosses, pour pouvoir enlever beaucoup de matière doivent être agressives et être utilisées avec un taux de pénétration élevé. Dans le cas présent, les surfaces adjacentes au *toit* sont critiques et ne peuvent être altérées d'aucune façon. Les brosses ne peuvent donc être utilisées que pour la finition. Comme les pièces ciblées ont des bavures sévères et que l'enlèvement de ces bavures est difficile, les abrasifs les plus agressifs disponibles seront priorisés. Les mousses de type unifié s'avèrent, après avoir effectué des tests manuels, être en mesure d'enlever la bavure efficacement et rapidement.



Figure 4.14 Produit abrasif *unitized wheel* de 3M®

Pour assurer un ébavurage efficace et uniforme, il faut maintenir une pénétration constante de l'abrasif dans la matière. À cette étape, deux problématiques surviennent. La première est que la géométrie à ébavurer a des dimensions très permissives, ce qui veut dire que la position et l'orientation peuvent varier de façon appréciable d'une pièce à l'autre de sorte qu'une programmation nominale des trajectoires d'outil ne permet pas une robustesse des résultats. Une méthode de palpage a été développée pour retrouver la dimension et l'orientation de la géométrie et la trajectoire d'ébavurage est générée de façon paramétrique en fonction de la géométrie et de l'outil. La seconde problématique est que ce type d'abrasif est friable. Il s'use durant l'opération d'ébavurage. Comme l'abrasive s'use et qu'il faut maintenir une pénétration constante de l'outil dans la matière pour assurer un ébavurage constant, il faut que l'outil plonge dans la matière progressivement durant son avance de manière à compenser son usure. La définition de ces paramètres se fait par expérimentation. La *Figure 4.15* schématise le calcul de la pénétration progressive.

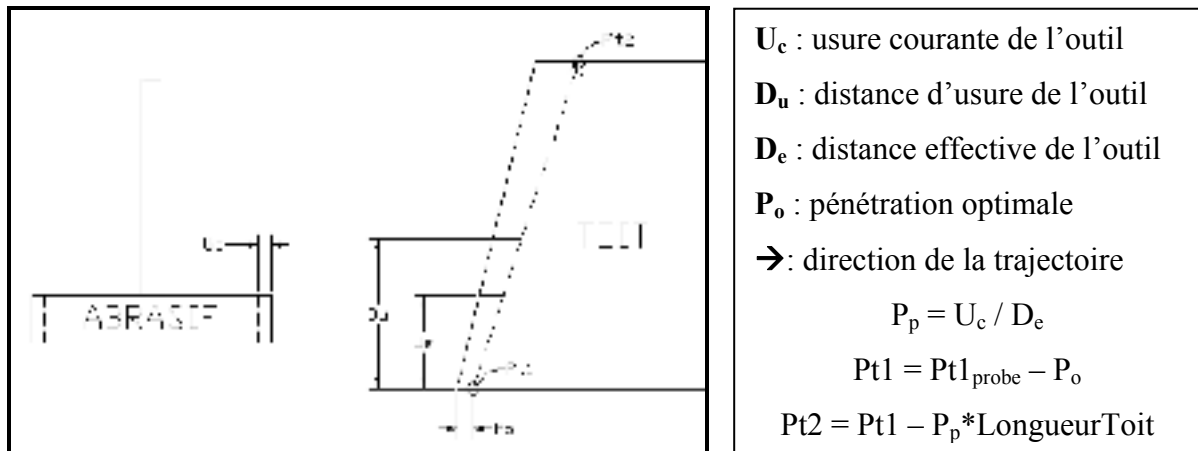


Figure 4.15 Schéma pour les calculs de pénétration progressive

Pour définir par expérimentation les paramètres de pénétration de l'abrasif dans la matière, il faut mettre en place une méthode de test structurée qui ne fait varier qu'un paramètre à la fois. Cette méthode se divise en trois étapes. En premier lieu, il faut définir la profondeur de pénétration à appliquer pour obtenir un résultat d'égavurage acceptable. Pour ce faire, il faut tester sur une courte distance différentes pénétrations d'outil jusqu'à obtenir la pénétration optimal (P_o). En second lieu, il faut définir la pénétration progressive (P_p), c'est-à-dire mettre une valeur numérique sur la profondeur de pénétration de l'abrasif par distance d'avance linéaire (mm/mm). On obtiendra un taux de pénétration progressive. Pour obtenir ce chiffre, on doit utiliser la profondeur de pénétration optimale et déterminer sa distance effective. L'abrasif s'usera jusqu'à ne plus être en contact avec la matière. C'est la distance d'usure (D_u) de l'abrasif. Cette valeur ne nous intéresse pas particulièrement puisque l'abrasif n'est plus efficace bien avant d'avoir parcouru cette distance. C'est plutôt en observant le résultat d'égavurage que la distance effective (D_e) de l'abrasif se révélera. D'après les résultats compilés plus tôt pour définir la profondeur de pénétration optimale, il est possible de comparer les résultats sur la portion non effective de la distance d'usure de l'abrasif pour déterminer quelle était la pénétration de l'abrasif, donc l'usure courante (U_c) de l'abrasif et, de ce fait, corriger sa pénétration. Avec cette correction, l'abrasif peut à nouveau parcourir une distance D_e , puis une nouvelle correction sera nécessaire. Par contre, une correction échelonnée donne un résultat d'égavurage inconstant. Pour corriger ce problème, la correction doit être faite progressivement, d'où le concept de pénétration progressive (P_p).

Comme la trajectoire est linéaire, seulement deux points sont générés. Le premier est à la profondeur P_0 à une extrémité du *toit* et le second est à l'autre extrémité et est plus profond que le point 1 d'une valeur qui est fonction de la longueur du *toit* et de la pénétration progressive.

La mousse agressive laisse une arête exempte de bavure avec un petit chanfrein tel que présenté dans le chapitre 6. Les trois premières étapes de l'ébavurage sont faites. Par contre, le désavantage est que le fini de surface laissé est grossier. Les brosses radiales à poils hérissés qui ne pouvaient pas enlever la bavure sont maintenant utiles pour accomplir la dernière étape qui consiste à améliorer et uniformiser le fini de surface. Comme le polissage est un travail léger, la pénétration de la brosse dans la matière n'est pas excessive et ne risque pas d'altérer le fini des surfaces critiques. Seul le chanfrein est poli.

La recette développée permet d'obtenir un résultat acceptable approuvé par les inspecteurs qualité. La recette est paramétrée pour la génération de trajectoire et le sera aussi pour les paramètres liés à l'enlèvement de matière de sorte à avoir un procédé générique qui puisse se transférer sur d'autres pièces. Pour comparer et contrôler l'enlèvement de matière avec les abrasifs, on utilise une formule de SFM (surface feet per minute). Si la pièce est en rotation, il faut calculer son SFM aussi. De cette façon, on peut définir un SFM pour un procédé et l'appliquer aux différentes pièces de sorte à obtenir le même enlèvement de matière d'une pièce à l'autre.

$$\text{SFM (pi/min)} = \text{RPM (rot/min)} \times D (\text{po}) \times \pi/12$$

Le procédé est maintenant à un niveau de maturité prêt pour la validation. Cette étape est décrite à la section 4.6 de façon générale puisque le processus est le même pour toutes les géométries.

CHAMBRAGES

Les chambrages sont priorisés pour des raisons de santé et sécurité, de qualité et de quantité. De par sa nature très répétitive, l'opération d'ébavurage peut être une cause de blessure. La zone de travail est confinée et les surfaces adjacentes très critiques. De plus, c'est une géométrie qui se retrouve sur la majorité des disques de turbine à environ 100 exemplaires. Les gains associés à l'automatisation de cette géométrie sont grands. D'entrée de jeu, l'automatisation de l'ébavurage des chambrages semble un défi de taille. La zone confinée et la sévérité des bavures pour le type avec rainure évoquent à priori un défi d'ébavurage. Cependant, la réalité est qu'un coup de lime permet d'enlever la bavure efficacement. De plus, les limes sont disponibles dans différents niveaux d'agressivité, ce qui permet d'en choisir une qui laissera un fini de surface acceptable, donc d'éliminer une opération subséquente de polissage.

La difficulté de l'ébavurage des chambrages réside plutôt dans la précision des mouvements de l'abrasif pour éviter d'endommager les surfaces critiques, puis dans un contact constant avec la pièce pour assurer un ébavurage complet et constant. Mis en perspective, c'est un défi réalisable avec un robot. Les robots permettent d'atteindre une infinité d'orientation. Par contre, la répétabilité des robots en orientation est peu connue. Il vaut mieux se laisser une marge de manœuvre sur l'orientation du robot pour éviter des collisions. L'autre facteur qui revient sans cesse est la précision du positionnement du robot ainsi que la précision et la répétabilité du positionnement de la pièce. Cette problématique peut être réglée par le contrôle de force qui permet d'assurer un contact constant et uniforme avec la pièce, donc un résultat uniforme d'ébavurage. Le contrôle du capteur de force avec un outil non rotatif s'effectue avec aisance et robustesse. Le bruit provenant des vibrations de l'ébavurage est minime et ne cause pas de problème dans le contrôle de force. Les particularités et limites du contrôle de force sont présentées au chapitre 5.

Avec des orientations sécuritaires du robot et grâce au contrôle de force, l'ébavurage des chambrages peut être réalisé avec la même recette pour tous les chambrages. Seules les

trajectoires varieront un peu d'une pièce à l'autre. La répétabilité des résultats est assurée par le robot, ce qui permet d'éliminer des problèmes de santé et sécurité. La difficulté liée à la zone critique est résolue par le choix d'orientations sécuritaires qui seront maintenues de fois en fois. Le robot muni d'un capteur de force permet un travail constant, efficace et d'une qualité répétable et robuste. Le procédé est prêt pour la validation.

TROUS

Les trous sont plus complexes à robotiser dans leur ensemble. Les configurations et accessibilités sont présentes en très grand nombre. Au départ, le plan de match est de développer une recette par configuration et, dans la mesure du possible, combiner quelques configurations pour développer un procédé plus générique. Ce qui est complexe avec les trous c'est qu'il n'y a pas de configuration classique dans laquelle on les retrouve. Dans le cas présent, les trous sont définis comme toutes ouvertures dans la pièce percées par un foret à travers n'importe quel type de surface dans n'importe quel angle. Les effets du perçage à travers des surfaces non planes ainsi que le perçage angulé ont été décrits dans la section 4.1.2. L'étude des configurations des trous permet de distinguer trois cas généraux qui sont illustrés à la *Figure 4.16* : (1) *le suivi de trajectoire* ➔ accessibles avec un outil conique parallèle à l'axe du trou pour ébavurer en suivant la trajectoire de l'arête du trou, (2) *la méthode pressée* ➔ accessibles avec un outil sphérique angulé par rapport à l'axe du trou pour ébavurer en appliquant une force dans l'axe du trou sur toute l'arête en même temps et (3) *le lissage* ➔ composés de surfaces multiples et accessibles uniquement avec un disque préformé pour lisser les surfaces en enlevant les bavures. Ces trois cas font naître trois procédés distincts pour l'enlèvement de la bavure. Le développement des procédés débute par la sélection des abrasifs. Comme il a été mentionné plus tôt dans l'étude des procédés actuels à la section 4.2, l'enlèvement de matière nécessite des outils rigides.

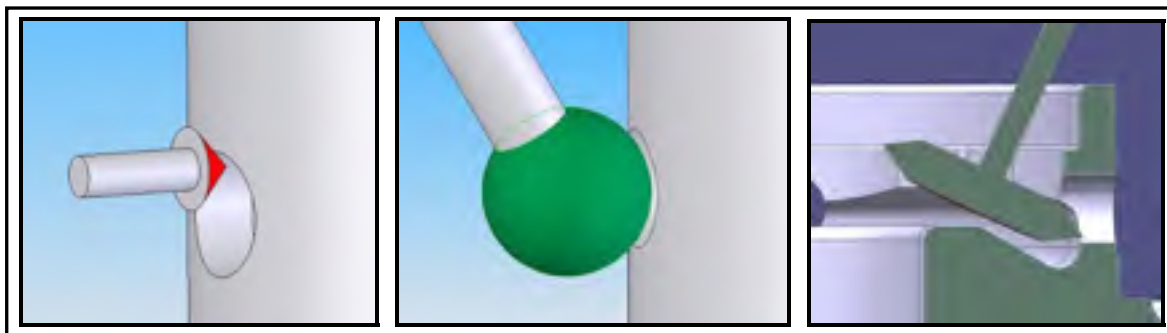


Figure 4.16 Les trois cas communs, dans l'ordre, pour l'ébavurage des trous : le suivi de trajectoire, la pression et le lissage

Pour le suivi de trajectoire, un outil conique avec une pointe à 90 degrés (voir le premier cas de la *Figure 4.16*) permet de former directement un chanfrein à 45 degrés. Le choix de l'abrasif est plus compliqué. Il faut considérer l'utilisation du robot, la capacité de l'abrasif d'enlever de la matière sur les alliages durs des disques turbines, puis la durée de vie de l'abrasif. L'abrasif devrait conserver sa forme pour assurer une constance dans le travail du robot. De plus, il ne devrait pas se dégrader trop rapidement et changer de dimension pour éviter d'avoir à remesurer l'outil constamment. Évidemment, l'abrasif doit être en mesure de façonner la pièce et non être façonné par elle. Finalement, l'abrasif devrait idéalement avoir une durée de vie minimale d'une pièce (soit 8 trous en moyenne) pour éviter la perte de temps en changement d'outil. Les abrasifs rigides utilisés pour l'ébavurage manuel sont souvent des pierres et sont composés, selon Gillespie [14, p.178], soit de carbure de silicium ou d'aluminium vitrifié. Le désavantage de ces abrasifs est qu'ils sont friables et perdent leur forme rapidement. Ils doivent donc être refaçonnés régulièrement et remesurés pour redéfinir leurs TCP. La plupart des abrasifs ont ce désavantage qui n'est pas intéressant pour l'automatisation. Le candidat intéressant pour remplacer ces abrasifs périssables est l'outil de coupe au carbure. Il est durable, ne se déforme pas et enlève la matière facilement sur les alliages durs. Son utilisation permet de rendre un procédé d'ébavurage robuste puisque les variabilités sur les dimensions des bavures n'ont que peu d'effet sur le résultat obtenu comme il est présenté au chapitre 6. Par contre, autant de rigidité veut dire qu'il n'y a pas place à l'erreur. La rigidité de l'outil ne lui permet pas de s'adapter, mais l'utilisation du contrôle de force lui donne cette capacité d'adaptation. L'utilisation des outils de coupe avec le contrôle

de force est décrite au chapitre 5. L'avantage des outils de coupe est que rien ne semble être à leur épreuve. Ceci devient une limitation lorsque l'enlèvement de matière est faible. Les outils de coupe ont la capacité d'enlever beaucoup de matière et le contrôle de l'enlèvement de matière avec le robot est fait indirectement par l'application d'une force pour maintenir le contact de l'outil avec la pièce. Il faut donc trouver une alternative aux outils de coupe lorsque l'enlèvement de matière est faible. Les abrasifs standards décrits précédemment ne sont toujours pas une bonne option pour la robotisation. Par contre, il existe une gamme de super abrasive qui ont les avantages à la fois des abrasifs et des outils de coupe. Ils permettent un meilleur contrôle sur l'enlèvement de matière tout en ayant une durée de vie accrue. Ce sont les supers abrasifs P.B.S.[®] présentés au chapitre 3. D'ailleurs, ils sont entre autre utilisés dans l'usinage des ailettes de turbine d'avion [26] qui sont aussi faites d'un super alliage de nickel.

Pour le cas de la pression, le même enlèvement de matière est requis. Cependant, la forme de l'abrasif change. Une forme sphérique permet d'attaquer le trou par *la méthode pressée* en approchant la boule dans l'orientation qui permet l'accès au trou. Dans le cas de *la méthode pressée*, si un outil de coupe est utilisé, plus l'outil comportera de flute, plus le fini sera impeccable. La limitation est pour les petits trous.

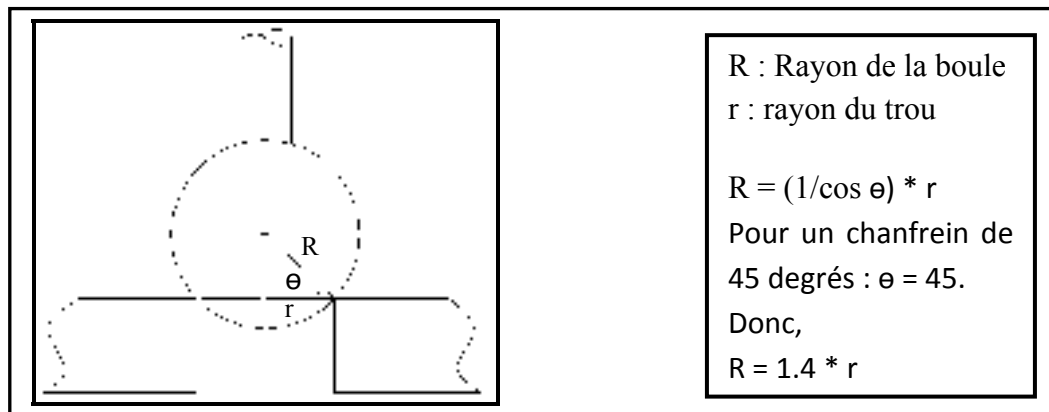


Figure 4.17 Ratio D/d pour l'ébavurage des trous par la *méthode pressée*

Étant donné qu'il faut respecter un ratio d'environ 1.4 entre le diamètre de la sphère et celui du trou pour obtenir un chanfrein à 45 degrés comme il est démontré à la *Figure 4.17*, il faut

une petite boule pour un petit trou. Or, les petites boules de coupe, selon une recherche des produits disponibles sur le marché, ne comportent pas suffisamment de flute, ce qui a pour effet de laisser des marques de lame de coupe sur la surface du chanfrein. Dans ce cas, les boules abrasives sont plus appropriées. L'autre facteur à considérer avec l'utilisation d'outil sphérique est la vitesse linéaire qui diffère dépendamment sur quel diamètre de la sphère le contact avec la matière se fait. Une vitesse linéaire différente signifie un enlèvement de matière différent voire même des conditions d'enlèvement de matière critique pour l'outil. La vitesse est maximale à l'équateur de la sphère tandis qu'elle est nulle aux pôles comme l'illustre la *Figure 4.18*. Il faut donc porter une attention particulière à l'angle dans lequel l'outil sphérique entre dans la matière. Il ne faut pas que les points de contact soient trop près des pôles et idéalement présenter une répartition des vitesses linéaires le plus symétrique possible par rapport au trou.

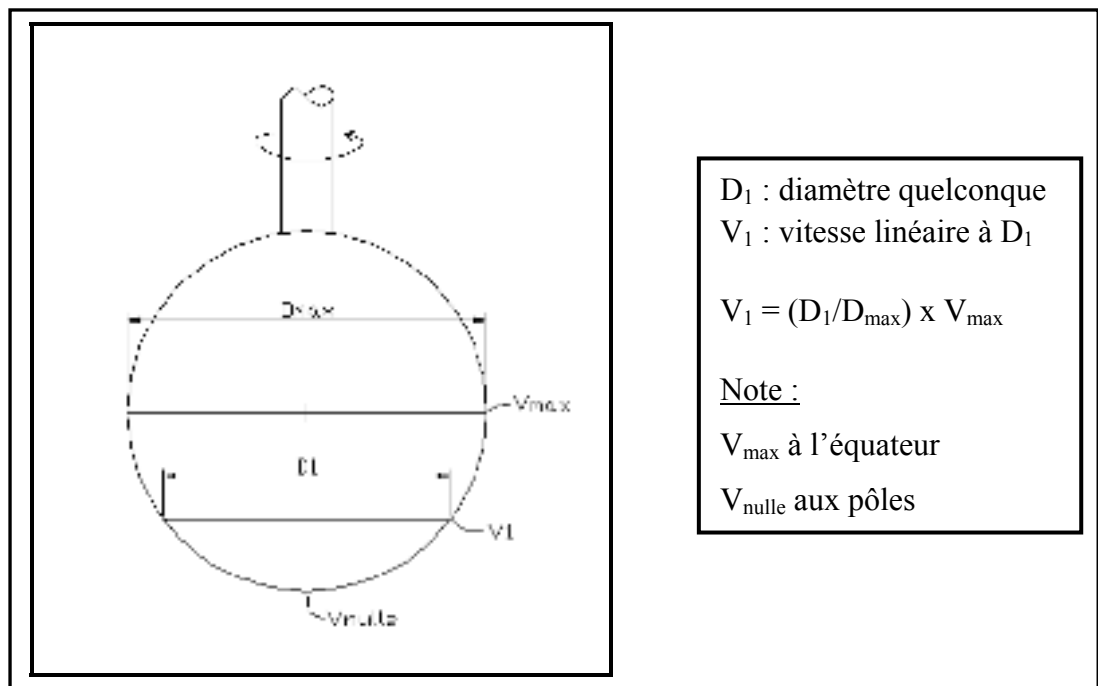


Figure 4.18 Répartition des vitesses linéaires sur une sphère en rotation

Le dernier cas, celui du lissage, attaque les trous qui traversent des surfaces multiples et qui ne sont réalisables avec aucune des deux méthodes présentées précédemment. L'approche préconisée est d'utiliser un disque abrasif et de lisser la surface où se trouve le trou pour

enlever la bavure et former un petit chanfrein. Le disque abrasif est façonné avec un angle pointu pour présenter une grande surface abrasive devant la bavure et pour donner une plus grande permissivité à l'angle d'attaque de l'outil de sorte à accéder plus facilement dans les zones confinées. Le choix de l'abrasif doit permettre de faire un enlèvement de matière rapide et robuste tout en n'altérant pas négativement le fini des surfaces environnantes. Les mousses du type unifiées se prêtent bien à ces besoins. Une gamme élaborée de densité et d'agressivité permet de répondre à des besoins spécifiques et multiples. L'élément intéressant avec les mousses unifiées est qu'elles peuvent enlever les bavures tout en laissant les arêtes exemptes de bavures secondaires. De plus, elles laissent les surfaces avec un fini déjà acceptable dans plusieurs cas. Cette méthode ne permet pas néanmoins de former un gros chanfrein ni même un chanfrein bien défini et constant. L'arête formée ressemble plutôt à un chanfrein aux coins arrondis. Une étape successive sera nécessaire pour grossir la dimension du rayon sur l'arête ainsi que pour uniformiser le rayon sur toute l'arête.

Pour chacun des trois cas décrit précédemment, une fois que la bavure est enlevée et qu'un chanfrein est formé sur l'arête, il faut, dans plusieurs cas, enlever les bavures secondaires et polir les surfaces. Dans certains cas, le requis est de chanfreiner l'arête du trou, mais il faut parfois former un rayon pour respecter le requis dimensionnels. Toutes ces étapes sont considérées comme faisant parties de la finition. Les méthodes de finitions proposées sont donc les mêmes pour les chanfreins que pour les rayons. Seul le temps de cycle variera pour s'adapter à l'enlèvement de matière nécessaire. Il est plus long de former un rayon sur un chanfrein que de le nettoyer des bavures secondaire parce que l'enlèvement de matière est plus important.

Puisque l'enlèvement de matière est plus important pour former un rayon, les efforts de développement du procédé et de recherche d'outillage sont concentrés sur cette portion de l'étape de finition en posant comme hypothèse que les méthodes et abrasifs pourront être réutilisés pour le nettoyage des bavures secondaires sur les chanfreins. Certains besoins ont été identifiés pour la sélection de l'abrasif. Tout d'abord, comme l'accès est souvent difficile par l'intérieur de la pièce, l'abrasif doit pouvoir faire un travail localisé sur l'arête extérieure et intérieure du trou depuis l'extérieur de la pièce. Vu que l'ébavurage se fait de façon

localisé sur les géométries et que les trous doivent être ébavurés tant sur l'extérieur que l'intérieur de la pièce, un outil qui permet de travailler l'arête en passant au travers du trou depuis l'extérieur est la solution appropriée. L'abrasif devra être flexible pour s'adapter à la forme du chanfrein, mais aussi à différentes dimensions de trou. Par contre, l'abrasif devra aussi être suffisamment agressif pour faire l'enlèvement de matière nécessaire à la formation du rayon, et ce, dans un délai raisonnable. Le type d'abrasif qui a le potentiel de combler ces besoins est la brosse radiale utilisé pour faire l'ébavurage de tube (voir *Figure 4.19*). Cette première étape de sélection est basée en grande partie sur la capacité du type de brosse d'accéder à la géométrie.



Figure 4.19 Exemple de brosse de rodage (gauche) et de brosse à tube en nylon (droite)

La sélection d'une brosse est compliquée et le choix final dépend de chaque application. La gamme de brosse disponible sur le marché est tellement vaste qu'il n'est pas simple de choisir la brosse appropriée à son application. Gillespie [2] propose quelques pistes pour démarrer la sélection des brosses. Comme dans le cas présent, il est important de bien définir ses besoins. C'est le critère d'accessibilité qui a permis de faire une première sélection. Les critères de flexibilité et d'agressivité sont plus compliqués à concilier puisque l'un est en quelque sorte l'antithèse de l'autre. La flexibilité d'une brosse s'obtient par des brins longs et minces tandis que l'agressivité s'atteint non seulement par un grain abrasif grossier (dans le cas de brosses imprégnées de grains abrasifs), mais aussi par des brins courts, de gros diamètres, donc rigides. L'expérimentation est inévitable pour déterminer les caractéristiques de la brosse qui permettent un compromis acceptable entre la flexibilité et l'agressivité. Une

brosse imprégnée de grains abrasifs permettra d'obtenir plus d'agressivité pour les mêmes dimensions de brin. C'est un atout pour atteindre le compromis désiré. Les brosses de nylon sont un excellent choix pour répondre aux besoins fixés. En cours d'utilisation, la chaleur du nylon augmente et le brin devient plus flexible. Il peut aussi facilement être imprégné de grains abrasifs. Malheureusement, l'expérimentation a permis de démontrer que les brins imprégnés d'abrasifs perdent leur flexibilité faisant perdre de la polyvalence à la brosse. Cette conclusion pousse la recherche d'abrasif plus loin pour trouver un produit qui rencontre les exigences de flexibilité et d'agressivité établis au départ. La brosse de rodage est aussi faite de brin de nylon et imprégnée d'une goutte d'abrasif à son extrémité. De cette façon, le brin conserve sa flexibilité associée à ses dimensions tout en atteignant l'agressivité recherchée par le biais des grains abrasifs. Finalement, l'expérimentation permet de confirmer la sélection de la brosse de rodage, mais permet aussi de constater que la brosse a moins d'effet sur l'arête externe du chanfrein, ce qui est logique puisque le brin fléchit moins sur cette portion du chanfrein. Il est donc nécessaire de sélectionner un abrasif qui peut former l'arête externe du chanfrein en même temps d'exécuter le polissage de la surface entourant le trou.

Une brosse radiale à poils hérissés est un candidat qui suscite l'intérêt par sa polyvalence. Ce type de brosse permet un enlèvement de matière efficace tout en laissant un beau fini de surface. Cette brosse ne sera pas utilisée dans l'axe du trou comme la brosse de rodage, mais plutôt sur la surface, donc perpendiculairement à l'axe du trou. Certains effets de l'utilisation de ces brosses doivent être analysés avant de développer le procédé d'ébavurage. Tout d'abord, la brosse doit attaquer le chanfrein de face pour avoir un effet. Un chanfrein attaqué de dos ne sera pas ébavuré. De plus, la brosse radiale doit attaquer l'arête le plus perpendiculairement possible parce son effet est maximal de cette façon. Les arêtes parallèles à la tangente de rotation de la brosse ne subissent pas d'ébavurage. L'arête d'un trou est circulaire, donc chaque portion d'arête est attaquée dans un angle différent. D'une vue de face d'un trou, les côtés seront plus ébavurés que le reste et les extrémums de la vertical ne seront pas ébavurés. Alors, pour ébavurer uniformément tout le pourtour du trou à cette

étape, il faut incliner la brosse par rapport à l'horizontal de plus et moins 45 degrés successivement, puis revenir à l'horizontal comme la *Figure 4.20* l'illustre.

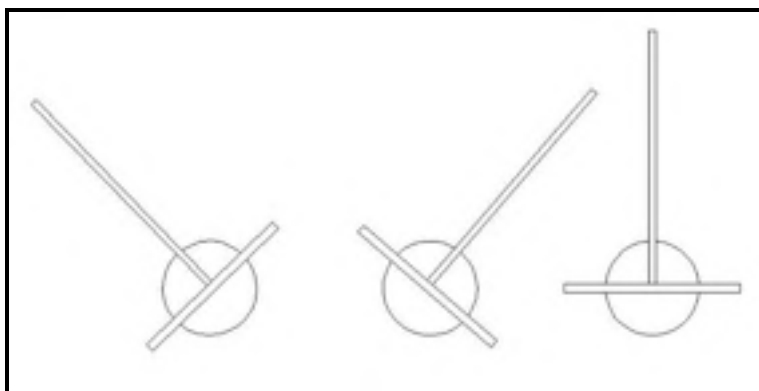


Figure 4.20 Méthode d'ébavurage des trous avec la brosse radiale

En ajustant le temps de cycle de chacune de ces trois étapes, il est possible d'atténuer la problématique liée à la formation du chanfrein avec *la méthode pressée*. Comme il a été expliqué précédemment à la *Figure 4.6*, *la méthode pressée*, sur une surface cylindrique, forme un chanfrein plus prononcé sur les extrémités verticales lorsque la surface est convexe tandis qu'il est plus prononcé sur les côtés lorsque la surface est concave. Les trois opérations de polissage doivent être faites avec l'abrasif en rotation horaire et anti horaire pour ébavurer tout le contour du trou. L'expérimentation a permis de confirmer que l'usage de la brosse à poils hérissés a surtout un effet sur l'arête externe du trou. Alors, l'usage combiné des brosses de rodage et à poils hérissés permet d'attaquer tout le chanfrein et de former un rayon complet et uniforme.

L'usage des mêmes méthodes et abrasifs permet, avec des temps de cycle plus courts, de faire le nettoyage des bavures secondaires sur le chanfrein tout en ne créant pas de rayon.

Trois procédés permettent de couvrir la totalité des trous à ébavurer depuis l'enlèvement de la bavure jusqu'au polissage. Dans le souci de standardiser, les opérations de finition sont les mêmes pour les trois procédés d'ébavurage des trous.

En bref, des procédés ont été développés pour faire l'ébavurage robotisé de trois géométries. Il a parfois été possible d'utiliser un minimum de technologie comme dans le cas des *toit*, mais le contrôle de force a été nécessaire pour réaliser l'ébavurage robotisé des chambrage et des trous.

4.5 Développement des technologies ciblées

En parallèle au développement des procédés, les technologies ciblées pour permettre la robotisation de l'ébavurage sont aussi en développement. Ces technologies concernent la localisation de la pièce et des géométries à ébavurer qui sera faite par palpement ou par reconnaissance de forme avec une caméra de vision. Puis, il y a aussi le contrôle de force qui a pour objectif de permettre l'utilisation d'outils rigides avec le robot.

La localisation de la pièce et des géométries a été testée par vision et par palpement. Plusieurs facteurs sont importants pour la localisation des géométries. Tout d'abord, la précision du positionnement et de l'orientation de la géométrie est primordiale pour que l'outil aille travailler au bon endroit. Ensuite, il faut s'assurer que la méthode de localisation est robuste, c'est-à-dire qu'elle permet une localisation aussi précise lorsque l'intrant varie, par exemple une bavure qui pourrait faire obstruction. Puis, la répétabilité de la localisation est aussi importante pour assurer un résultat d'ébavurage répétable. Les expérimentations durant le développement ont permis de constater que les configurations robots ont une influence sur la précision de positionnement, ce qui confirme l'information trouvée dans la littérature [6]. D'autre part, on sait que la relation entre les différents TCP est très importante pour s'assurer que l'abrasif ira au même endroit que ce qui a été localisé et non décalé de cette position. Pour réaliser cet exploit, plusieurs idées ont été mises de l'avant et des méthodes ont été développées pour atteindre cet objectif. Le développement des technologies et méthodes de calibration est décrit au chapitre 5.

L'utilisation du contrôle de force doit être développée pour les conditions spécifiques d'ébavurage du projet. Le succès de l'utilisation du contrôle de force compensera les

imprécisions et permettra l'utilisation des outils rigides. Un module de contrôle de force a été développé par ABB pour faire de l'ébavurage. Par contre, aucune méthode n'est prescrite pour définir les paramètres de force selon notre application. Par ailleurs, l'application visée dans le projet ne correspond pas à l'utilisation prévue du module d'ébavurage que propose ABB. Une série de paramètres influence le contrôle de force. Il faut donc définir une méthode pour analyser l'effet de chacun de ces paramètres. Le développement détaillé de l'utilisation du contrôle de force sera décrit au chapitre 5.

La réalisation de l'objectif de départ de démontrer la faisabilité de robotiser l'ébavurage passe par le succès du développement des technologies de localisation et du contrôle de force. Les procédés sont développés en fonction des capacités que le robot aura grâce à ces technologies.

4.6 Validation des procédés d'ébavurage

Une fois que la recette du procédé est définie, il faut la valider pour s'assurer de sa robustesse et de sa répétabilité sans oublier de vérifier que l'usage des abrasifs n'altère pas chimiquement ou mécaniquement les propriétés de la pièce. Dans le domaine aéronautique, comme dans le reste du secteur du transport, des normes sévères régissent le contrôle de la qualité des produits. Chaque composant nécessaire au bon fonctionnement de l'appareil dans un contexte sécuritaire est classé comme étant critique et doit être soumis à un contrôle du service de l'ingénierie pour fournir au ministère du transport les preuves comme quoi le produit fabriqué rencontre les normes en vigueur. La validation du procédé se divise en plusieurs étapes qui commence par l'obtention du premier résultat respectant les requis d'ébavurage. Ce premier résultat est vérifié visuellement et dimensionnellement par les inspecteurs de la qualité pour confirmer le respect des requis. Lorsqu'un résultat accepté est obtenu à au moins cinq reprises, on peut considérer que ce n'est pas un coup de chance et que le procédé est suffisamment mature pour être soumis à des tests de répétabilité et de robustesse à petite échelle. À ce stade, il faut tester les différentes configurations qui touchent le procédé ainsi que les variabilités de l'intrant. Ceci permet de valider la robustesse du

procédé pour être appliqué de façon générique. En répétant chacun des tests de robustesse à au moins cinq reprises, la répétabilité est validée à petite échelle. Ces tests permettent de donner de la confiance au procédé. C'est maintenant le temps de préparer une pièce de test pour l'ingénierie. Cette pièce permet de démontrer les résultats obtenus lors des tests de robustesse et de répétabilité. La pièce servira à vérifier que la conformité du produit est respectée, c'est-à-dire que la microstructure n'est pas altérée, qu'aucun stress mécanique n'est induit à la pièce lors de l'ébavurage, que la durée de vie en fatigue de la pièce n'est pas affectée, etc. Un résultat négatif à ces tests mènera à un ajustement du procédé tandis qu'un résultat positif mènera à une pré-approbation qui permettra de conduire des tests de répétabilité à grande échelle sur des pièces de production. C'est à cette étape que la durée de vie des abrasifs sera déterminée définitivement. Si les résultats sont répétables et dans les requis, l'approbation sera approuvée pour une mise en production.

CHAPITRE 5

SÉLECTION DES SOLUTIONS ET DÉVELOPPEMENT DES TECHNOLOGIES

Ce chapitre explique le choix des technologies utilisées pour l'ébavurage et détaille le développement de l'utilisation du contrôle de force pour l'ébavurage robotisé. Dans un premier temps, deux types de machines sont comparées pour faire l'ébavurage et l'une d'entre elles est sélectionnée pour le développement. Ensuite, plusieurs méthodes de localisation des géométries sont proposées et comparées. Les avancées dans le projet pour l'utilisation de ces technologies permettent de mieux cerner les avantages et les inconvénients de chaque méthode. Finalement, le développement de l'utilisation du contrôle de force pour l'ébavurage de pièces aéronautiques critiques démontre certains avantages et quelques limitations qui seront présentées dans ce chapitre.

5.1 Sélection de la machine d'ébavurage : Robot vs CNC

Le choix parmi ces deux types de machines s'est fait selon plusieurs critères : la précision, l'adaptabilité, la polyvalence, le coût et la disponibilité. L'évaluation de deux types de machines débute par une comparaison des critères, puis se complète par l'analyse de différents scénarios.

Premièrement, les CNC (Computer Numerical Control – Machines-outils à contrôle numérique) sont des machines très précises et répétables. Leur utilisation est bien connue et beaucoup de développement s'est fait dans les dernières décennies et se fait toujours. Ce sont des machines rigides qui sont composées à la base de trois axes linéaires pouvant être complétés d'un ou deux axes rotatifs dans les cas les plus fréquents. Généralement, l'outil se déplace sur les axes linéaires et la pièce est fixe ou montée sur une table rotative. Les centres d'usinage sont conçus et dédiés à l'usinage et sont donc peu enclins à exécuter d'autres types d'application. Elles sont aussi coûteuses (250 000\$ et plus).

Deuxièmement, les robots sont peu précis, mais plutôt répétables. Ils peuvent retourner à une position enseignée ou programmée de façon répétée, mais offre peu de précision pour se rendre à une position cartésienne. C'est leur constitution qui les rend imprécis. Les robots industriels les plus répandus sont une succession de membrures et de moteurs rotatifs mis en série qui en font un mécanisme peu rigide et peu précis. Par contre, leur précision peut être beaucoup améliorée par l'ajout de capteurs externes comme un palpeur, un laser ou une caméra. C'est grâce à la calibration que les robots peuvent améliorer leur précision. Ce sujet est discuté plus en détail à la section 5.2. D'autre part, le coût de base d'un robot est faible, mais il peut augmenter rapidement avec l'ajout d'accessoires et la fabrication d'une cellule pour contenir le robot. Cependant, une cellule robotisée est très polyvalente. Elle peut servir pour beaucoup d'applications et il est facile d'y intégrer des systèmes auxiliaires comme une caméra ou un système d'inspection. Le robot lui-même est aussi très polyvalent puisqu'il peut travailler dans un grand volume et atteindre des positions dans une infinité d'orientation et de configuration. Il peut reproduire la plupart des mouvements d'un humain. Combiné à un capteur de force, le robot peut devenir très adaptable et compenser son imprécision. Finalement, une cellule robotisée de développement munie de plusieurs équipements essentiels au développement de l'ébavurage automatisé était disponible dans le milieu de développement industriel.

D'autres possibilités sont aussi envisagées bien que la tangente du projet ne soit pas encore dirigée vers ces solutions. Parmi ces solutions, il y a la possibilité de dédier une CNC spécialisée à l'ébavurage. Cette machine remplacerait le robot. Il se vend sur le marché des CNC conçues pour des travaux plus légers qui sont moins dispendieuses. FANUC vend des modèles de trois à cinq axes qui se chiffrent dans les 100 000 \$. Cette solution est intéressante puisqu'elle offre la précision à moindre coût. L'autre solution est d'incorporer des opérations d'ébavurage sur les CNC dans le même montage que l'usinage. Cette solution peut être très profitable puisque le montage est déjà fait, donc la précision du positionnement de l'outil sur la pièce est assurée. De plus, la machine est déjà disponible et cette technologie peut assurer la qualité, la répétabilité et la robustesse pour la formation d'un chanfrein. Certaines opérations de transport de pièce pourraient être supprimées et les temps d'attente

entre les opérations diminués. Par contre, le désavantage est que les centres d'usinage sont souvent déjà utilisés à pleine capacité et l'ajout d'opérations n'est pas toujours envisageable. Les solutions sur CNC sont à priori très intéressantes puisque leurs implémentations est rapides et faciles. Par contre, la disponibilité des machines est souvent un frein. D'autre part, l'ébavurage avec des outils abrasifs génère beaucoup de poussières et les CNC ne sont pas prévues pour travailler dans ces conditions. Premièrement, les axes doivent être protégés des particules de poussières abrasives pour ne pas s'endommager et faire perdre de la précision à la machine. D'autre part, les centres d'usinage travaillent généralement dans un environnement humide, donc les poussières abrasives vont générer une boue que le système de filtration n'est pas conçu pour filtrer. Il risque donc de se bloquer et de déborder. Ces systèmes de filtration sont conçus pour des copeaux métalliques de plus grandes dimensions. Alors, un centre d'usinage ne sera pas efficace pour faire à la fois de l'usinage et de l'ébavurage. L'alternative est donc de dédier la machine CNC à l'enlèvement de matière ou à la finition. Il n'est pas souhaitable de faire les deux opérations sur la même machine CNC.

Il y a assurément un gain à faire l'enlèvement de matière de l'ébavurage sur CNC puisque c'est l'opération la plus ardue et qui prend le plus de temps sur les bancs d'ébavurage. Cependant, pour prouver ce gain, il faut faire du développement et compiler des résultats qui démontrent les avantages de cette solution. D'autre part, il reste encore les étapes de finitions et certaines géométries dont la réalisation de l'ébavurage sur CNC est peu envisageable.

Finalement, la solution robotisée offre beaucoup d'avantages bien qu'elle présente aussi certains défis technologiques. Sa polyvalence, sa disponibilité et son faible coût en font la solution privilégiée. De plus, les percées technologiques dans l'utilisation des robots pour l'ébavurage de précision pourront servir à faire avancer les connaissances nécessaires à l'utilisation des robots pour des tâches de précision.

5.2 Choix de la méthode de localisation des géométries

Les pièces à l'étude sont des pièces rotatives. Pour effectuer l'ébavurage sur toute leur périphérie, une idée intéressante est de monter la pièce sur un mandrin rotatif. De cette façon, le volume de travail du robot peut aussi être limité à une petite portion de la pièce. En faisant tourner la pièce autour de son axe, elle devient accessible dans sa totalité. Étant donné que plusieurs opérations d'ébavurage sont exécutées de façon localisée sur une géométrie, il est nécessaire de localiser cette géométrie et de l'indexer dans une orientation précise. Plusieurs technologies ont le potentiel de réaliser la localisation des géométries sur une pièce. Par contre, elles ont toutes des requis communs à respecter qui n'ont pas nécessairement de lien avec leurs capacités technologiques.

Peut importe la méthode ou la technologie utilisée pour localiser une géométrie et aller exécuter une opération d'ébavurage avec un autre outil sur cette géométrie, la relation entre la position trouvée et la position à laquelle l'outil d'ébavurage se rend est la relation la plus importante pour la réussite de l'ébavurage robotisé. Non moins important, il y a aussi la précision de la position trouvée de la géométrie qui peut s'obtenir grâce à des TCP (Tool Center Point) précis et à des méthodes de calculs qui diminuent les erreurs relatives ou les erreurs moyennes.

Pour obtenir une relation de précision entre la position trouvée et la position à laquelle l'outil d'ébavurage se rendra, il faut définir des méthodes de calibration et des bonnes pratiques d'utilisation du robot. En premier lieu, il faut définir les TCP des différents outils. La méthode de calibration des TCP doit être standardisée et précise. La technique de calibration des TCP que les fabricants de robot proposent généralement est d'apporter le bout de l'outil avec le robot à un point fixe dans l'espace comme l'illustre la *Figure 5.1*.

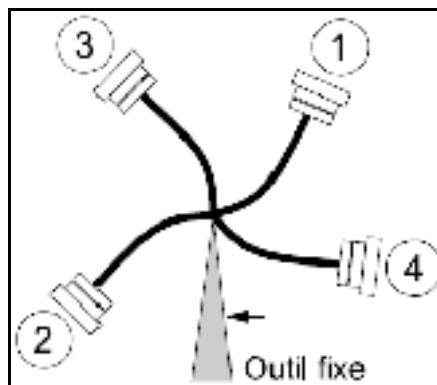


Figure 5.1 Méthode de calibration par quatre points d'ABB
Tirée de la documentation d'ABB [3]

Il faut répéter cette étape entre quatre et neuf fois en apportant la pointe de l'outil avec le robot dans diverses orientations, mais toujours au même point. L'idéal est de varier le plus possible les orientations du robot entre chaque point. Tous ces points passent ensuite dans un algorithme qui calcule la position du TCP par rapport au référentiel du robot. Les points sont souvent créés par un opérateur qui déplace le robot manuellement. La précision de positionnement de la pointe de l'outil se fait alors de manière visuelle. Cette méthode est peu répétable, i.e. que si trois opérateurs tentaient de définir le TCP d'un outil avec cette méthode, les trois TCP seraient différents et d'une précision variable. L'algorithme de calcul du TCP fait en quelque sorte une moyenne du nuage de points créé pour définir la position du TCP et tente d'optimiser sa précision dans différentes orientations. Étant donné qu'un robot n'est pas un système linéaire, l'optimisation est difficile et ne peut pas éliminer complètement l'erreur dans toutes les orientations. Le calcul d'optimisation tente plutôt d'obtenir une position du TCP qui diminuera l'erreur moyenne. Cette méthode de calibration demeure intéressante puisqu'elle optimise le TCP pour qu'il soit plus précis dans le maximum d'orientations possibles. Pour améliorer la précision du TCP, une définition plus précise des points de calibration doit être faite. Pour ce faire, une idée intéressante est d'utiliser un capteur externe pour vérifier la position relative du robot et corriger sa position de sorte que chacun des points de calibration soit le plus précisément possible au même endroit. De plus, une routine de calibration qui utilise toujours les mêmes orientations pour la calibration permettra d'obtenir un TCP répétable d'une fois à l'autre. Il devient dès lors

intéressant d'automatiser la calibration des TCP en utilisant la programmation hors ligne et un capteur externe pour gérer la position du robot. Par contre, les TCP intangibles sont plus difficiles à définir avec précision et plus compliqués à automatiser. Ce cas particulier sera discuté plus loin lors de la comparaison des technologies pour la localisation. En second lieu, il faut définir des bonnes pratiques d'utilisation du robot tant pour la calibration que pour l'exécution des tâches d'ébavurage. Tout d'abord, sachant que les configurations d'un robot ont une grande influence sur sa précision de positionnement, i.e. que si le robot est apporté à une position cartésienne dans plusieurs orientations sa position réelle ne sera pas la même pour chaque configuration. Pour améliorer la relation entre les différents TCP ainsi que la précision de positionnement du robot, limiter les grands changements de configuration sera un atout important. Dans un premier temps, concevoir les supports d'outils pour que tous les outils aient un TCP sensiblement au même endroit par rapport au référentiel du robot améliorera la relation entre les TCP. De plus, une routine de calibration automatique générique et standardisée permettra de calibrer tous les TCP de la même manière, ce qui augmentera la précision et la répétabilité de la relation entre les TCP. Dans un second temps, utiliser les mêmes parcours d'outil pour s'approcher de la pièce autant pour la localisation que l'ébavurage tout en limitant les grands changements de configuration robot. Surtout, lors de la localisation, utiliser les mêmes orientations et configurations qui seront utilisées lors de l'ébavurage autant qu'il est possible de le faire, sinon minimiser les changements. Maintenant, si des erreurs subsistent, il faut définir des méthodes de localisation qui permettent d'éliminer les erreurs relatives dans les calculs de positionnement de la géométrie. Au final, s'il peut ne rester que l'erreur de répétabilité du robot, elle pourra être compensée autrement comme le seront les variabilités imputables aux tolérances de fabrication des pièces. La liste qui suit est un sommaire des bonnes pratiques d'utilisation du robot et de la calibration des TCP pour améliorer la précision du positionnement du robot et la relation entre les différents TCP d'outil :

1. Méthodes de calibration des TCP

- a. utiliser un capteur externe pour vérifier et corriger la position des points de calibration,

- b. toujours utiliser les mêmes points et orientations pour calibrer un TCP,
 - c. standardiser la routine de calibration pour tous les TCP d'outil.
2. Méthodes d'utilisation du robot
- a. utiliser les mêmes parcours d'outil pour localiser et ébavurer la pièce,
 - b. limiter les changements de configuration sur les trajectoires,
 - c. concevoir les supports d'outil pour que les TCP soient similaires.

Quelques technologies ont été envisagées pour localiser les géométries sur les pièces. Ces technologies ont été sélectionnées avant de définir les méthodes de calibration et les bonnes pratiques d'utilisation des robots puisque ce sont entre autres les expérimentations avec ces technologies qui ont permis de mettre au jour ces méthodes. La première technologie ciblée a été une caméra de vision intelligente. Elle a été montée côte à côte avec l'outil d'ébavurage dans le but de localiser et d'immédiatement aller faire l'ébavurage sans changement d'outil. Les TCP sont relativement près l'un de l'autre. Par contre, il n'est pas toujours possible de localiser et d'ébavurer dans les mêmes configurations robots. L'avantage d'utilisation de la caméra est qu'elle permet de faire de la reconnaissance de forme rapidement et avec une précision relative intéressante. Qui plus est, elle est très polyvalente. Elle permet de localiser des géométries complexes avec la même approche que des géométries simples. Cependant, le désavantage est que la calibration du TCP est complexe puisqu'il est d'une part intangible et d'autre part très sensible aux conditions de lumière. De plus, la méthode de calibration du TCP d'une caméra diffère beaucoup de la méthode de calibration par point proposée par les fabricants de robot. La caméra utilise plutôt une grille de calibration qui permet de définir les six degrés de liberté de son TCP. La caméra a donc un TCP intangible ainsi qu'une méthode de calibration complexe qui rend difficile la définition d'un TCP précis et ayant une bonne relation avec les autres TCP. De plus, elle a besoin d'un autre capteur pour aller définir des positions de référence qui lui permettront de se positionner au focus de la lentille pour faire la localisation. La seconde technologie est un palpeur mécanique (*'Probe'*). Son utilisation est bien connue et il est largement utilisé dans le monde de l'usinage et de la métrologie. C'est un appareil précis et répétable. Certaines lacunes au point de vue des jeux mécaniques et des délais de réponse sont connues et des méthodes ont été développées pour éliminer ces

imprécisions. Beaucoup de méthodes de localisation sont déjà développées et peuvent être réutilisées pour accélérer l'intégration et l'utilisation de l'appareil sur un robot. Le support du palpeur a été conçu de façon à ce que son TCP soit pratiquement au même endroit que celui de l'abrasif. Le palpeur peut localiser dans les mêmes orientations et configurations robot que l'outil abrasif. Auparavant, le palpeur était orienté différemment de l'outil abrasif et des erreurs de relation entre les TCP étaient flagrantes. Deux expérimentations ont été conduites pour vérifier l'erreur de position causée par les changements d'orientation. Dans un premier temps, le rubis du palpeur a été apporté par le robot à une même position cartésienne dans 5 configurations différentes. Les erreurs relevées variaient entre 0.5 et 1.5 mm. Dans un second temps, un test de relation entre les TCP a été effectué entre le palpeur et l'outil abrasif. Les deux TCP ont été calibrés grâce une routine automatique pour éliminer la variabilité du facteur humain. Deux cas de figure ont été soumis à l'épreuve. Le premier cas (1) met en cause des TCP dans des configurations différentes tandis que le second cas (2) implique deux TCP dans la même configuration et positionnés au même endroit par rapport au référentiel du robot. L'expérimentation consiste à mesurer avec le palpeur cinq points par cadran (voir *Figure 5.2*) sur une pièce pour un total de 20 points et d'apporter le TCP de l'abrasif à une distance constante de chacun des ces points.

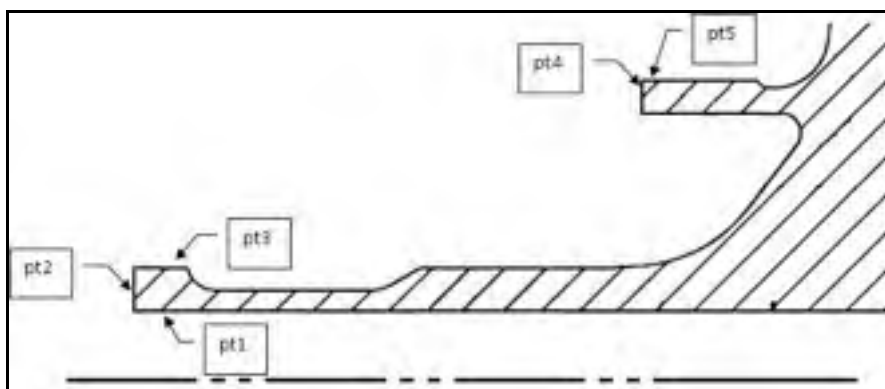


Figure 5.2 Représentation des cinq touches par cadran pour le test de relation des TCP

Chaque distance est mesurée entre le TCP et la pièce au moyen de jauges mécaniques. Le différentiel entre la distance mesurée et la distance programmée devient l'erreur de

positionnement. Les erreurs moyennes mesurées sont présentées dans le *Tableau 5.1*. Le cas 2 apporte un gain notable pour la relation de précision entre les TCP.

Tableau 5.1 Erreur de position entre les TCP
due aux configurations robot

Cas	Erreur moyenne (mm)
1	1.5
2	0.5

Finalement, la dernière technologie envisagée, mais non testée, est de faire de la localisation par une insertion mécanique avec l'aide d'un contrôle de force. L'objectif est de créer un ou quelques points de références sur la pièce en insérant l'outil abrasif dans la pièce. Ces positions deviennent des référentiels relatifs à la pièce, donc des points de départ connus sur la pièce pour aller effectuer l'ébavurage avec un positionnement précis dans un volume défini.

Finalement, le palpeur s'avère être la technologie qui nécessite le moins de développement avec laquelle la définition d'un TCP précis et en relation avec celui de l'abrasif a le meilleur potentiel. De plus, son coût est beaucoup moindre qu'une caméra intelligente et son utilisation plus simple.

En bref, la sélection d'une technologie simple, peu coûteuse et bien connue combinée à des méthodes de calibration et d'utilisation du robot intelligentes, uniformes et standardisées permettra de minimiser les erreurs de positionnement, mènera au succès du développement de l'ébavurage robotisé et facilitera l'implémentation en production. Le palpeur mécanique est donc, pour ces raisons, la technologie sélectionnée.

5.3 Développement de l'utilisation du contrôle de force pour l'ébavurage robotisé

Une fois que le maximum d'erreur a été diminué par la calibration et que de bonnes méthodes sont mises en application pour l'utilisation des robots, les erreurs résiduelles de répétabilité du robot ainsi que les tolérances de fabrication des pièces doivent être compensées pour obtenir un résultat d'ébavurage constant, répétable et de qualité. L'utilisation d'un contrôle de force pour exécuter l'ébavurage a le potentiel de pouvoir compenser les erreurs et variabilités restantes. Cette technologie doit être évaluée pour déterminer si elle est en mesure de remplir les besoins de l'ébavurage robotisé de précision. L'analyse de l'utilisation du contrôle de force pour l'ébavurage se fait en deux temps, le premier, étant théorique, consiste à évaluer les possibilités qu'offre ABB pour le contrôle de force afin de choisir une approche qui convienne à l'application d'ébavurage du projet. Ensuite, il faut analyser l'influence théorique de chacun des paramètres et l'impact de la programmation sur le contrôle. Puis, l'analyse des efforts de coupe par rapport au référentiel de force permettra de définir certains paramètres d'ébavurage qui favoriseront un meilleur contrôle de la force. Le second temps de l'analyse est expérimental et consiste à élaborer et exécuter un plan de test pour évaluer l'influence des paramètres de force dans les conditions réelles d'ébavurage. Le contrôle de force sera testé jusqu'à ses frontières de stabilité pour définir les limites de son utilisation en ébavurage robotisé de précision. Finalement, à des fins de comparaison et afin de s'assurer que le contrôle logiciel de force est la solution appropriée à développer, un outil à compensation pneumatique sera évalué dans les mêmes conditions d'ébavurage que le contrôle logiciel de force.

5.3.1 Développement théorique

Le développement théorique débute par la sélection de l'approche du contrôle de force qui se prête à l'application d'ébavurage du projet. Deux solutions sont proposées par ABB : le module à vitesse variable et celui à pression constante. La *Figure 5.3* illustre leurs principes.

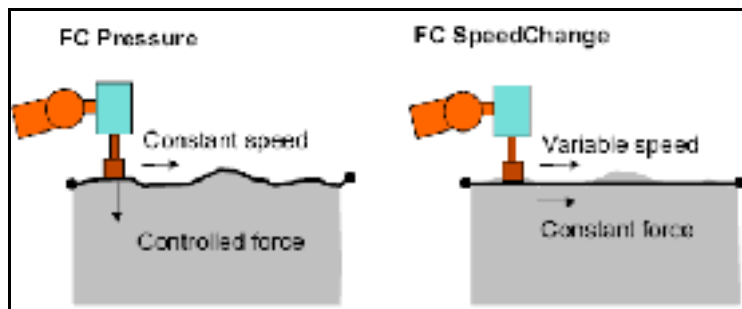


Figure 5.3 Deux modules de force offerts par ABB pour l'ébavurage
Tirée de la documentation d'ABB

En premier lieu, le module à vitesse variable pourrait servir par exemple dans une application de rectification où une trajectoire est prédéterminée pour faire un nombre de passe qui permettra d'effectuer un enlèvement de matière déterminé. Dans ce cas, la trajectoire ne s'adapte pas à un profil ou une surface à suivre, mais ce sont plutôt les paramètres de coupe qui s'adaptent à la quantité de matière qui se présente devant l'outil. Le capteur de force, en ressentant une amplitude de force plus élevée que le seuil défini, commandera un ralentissement de la vitesse d'avance du robot. Il peut aussi modifier la vitesse de rotation de l'outil pour optimiser l'enlèvement de matière. Si la force ressentie est très grande parce qu'il y a trop de matière à enlever, le robot peut passer par plusieurs paliers de ralentissement ou passer à une routine de recouvrement préalablement programmée pour décaler l'outil de la matière et faire plusieurs passes sur la zone où il y a beaucoup de matière à enlever pour ensuite continuer sa trajectoire initiale. Bref, cette option ne rend pas la trajectoire adaptable à un contour plus ou moins connu par l'entremise du contrôle de force. Elle propose plutôt des trajectoires alternatives à la trajectoire nominale initiale selon la force ressentie au capteur. Cette solution est intéressante pour une application de rectification dans l'optique d'optimiser les conditions de coupe et les vitesses de déplacement de la meule. En second lieu, le module à pression constante se prête bien pour des opérations d'ébavurage et de polissage. Son principe est de s'adapter à un contour préalablement programmé de sorte à maintenir une force constante normale tout au long de la trajectoire. Ce principe s'applique mieux au contexte d'ébavurage du projet que l'option à vitesse variable. C'est donc l'option à pression constante qui est utilisée pour le développement.

Maintenant que l'approche du contrôle de force est déterminée, le développement théorique commence par l'étude des paramètres influents le contrôle de force. Ensuite, il faut analyser comment le référentiel de force dynamique se génère pour déterminer l'orientation de la force à appliquer et évaluer l'impact des efforts de coupe de l'opération d'ébavurage sur l'application de la force. Finalement, la méthode de programmation aura aussi une influence à tenir en compte dans le contrôle de la force. En premier lieu, pour expliquer le rôle des paramètres un exemple de code robot permet de situer l'implication de chacun dans la chronologie de la trajectoire. Le code suivant est un exemple fictif d'une procédure d'ébavurage avec un contrôle de force :

```
PROC EbavurageForce()

    ! Approche vers la trajectoire en contact.
    MOVEL Approche1, v5, z1, tool0\Wobj0;
    MOVEL Approche2, v5, z1, tool0\Wobj0;
    MOVEL Approche3, v5, z1, tool0\Wobj0;

    ! Portion en contact, donc avec un contrôle de force.
    FCPRESS1LStart Start, v5\Fx :=50, 50\ForceFrameRef :=
        FC REFFRAME PATH
        \ForceChange :=100\DampingTune :=500\TimeOut :=
        60\UseSpdFFW, z1, Tool0\WObj :=wobj0;
    FCPRESSL Via1, v5, 50, z1, tool0\Wobj0;
    FCPRESSL Via2, v5, 50, z1, tool0\Wobj0;
    FCPRESSEND End,
    v5\ForceChange :=50\ZeroContactValue :=20, tool0\Wobj0;
    ! Retrait de la trajectoire en contact.
    MOVEL Retrait, v5, z1, tool0\Wobj0;

ENDPROC()
```

Les points d'approche et de retrait passent dans des instructions de déplacements linéaires (MOVEL) tandis que la trajectoire d'ébavurage en contact passe par des instructions de contrôle de force comme : FCPRESS1LSTART, FCPRESSL et FCPRESSEND. Ces instructions comportent, en plus des paramètres habituels des instructions de déplacement, quelques paramètres supplémentaires qui servent au contrôle de force pour l'entrée en matière, pendant le contact et lors de la sortie de la matière. Tout d'abord, il y a l'entrée en matière qui se fait lors de l'activation du contrôle de force par l'instruction suivante :

```
FCPress1LStart Point Vitesse [\Force] Threshold
                [\ForceFrameRef]  [\ForceChange] [\DampingTune]
                [\TimeOut]  [\UseSpdFFW] Zone Tool [\WObj]
```

Force

Ce paramètre correspond à la force en Newton à appliquer dans une direction du référentiel de force choisi. La force peut être définie dans la direction X, Y ou Z.

Ex. : $F_x := 50$

Threshold

Ce paramètre est le seuil de force à atteindre lors de l'entrée avant de se diriger vers le premier point de la trajectoire. La valeur de ce paramètre est un pourcentage de la force à appliquer durant la trajectoire.

ForceFrameRef

Ce paramètre définit le référentiel de force choisi. Il existe trois possibilités de référentiel. Une force peut être appliquée dans une des directions d'un référentiel cartésien du système. La force peut aussi être appliquée l'une des directions d'un référentiel d'outil (TCP). Dans ce cas, si l'orientation du TCP change d'un point à un autre, l'orientation de la force suivra, donc l'orientation de la force changera par rapport au référentiel cartésien de travail. La dernière option est d'utiliser un référentiel de force dynamique qui s'adapte à la trajectoire. C'est le cas de l'exemple de code de la page précédente. Cette option permet d'appliquer une force normale à une trajectoire même si la direction de la trajectoire est changeante comme dans le cas du contour d'un trou par exemple (voir la *Figure 5.5*).

ForceChange

Ce paramètre contrôle la vitesse d'application de la force sur l'entrée. Un paramètre identique est utilisé pour la sortie de la matière.

DampingTune

Ce paramètre agit sur la rigidité du contrôle de force. C'est un paramètre d'amortissement. Plus la valeur est grande, moins le système est sensible aux forces externes, donc moins il compensera pour les erreurs de position de la trajectoire. La valeur d'amortissement configurée est en N s/m, mais la valeur du paramètre qu'il est possible d'insérer dans l'instruction FCPRESS1LSTART est en pourcentage et correspond au pourcentage de la valeur configurée dans le contrôleur.

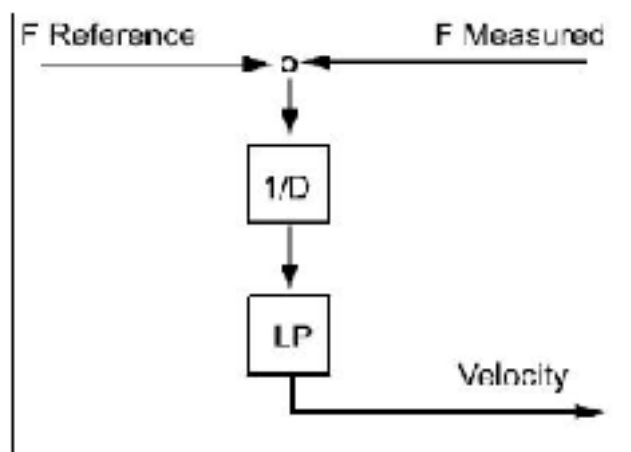


Figure 5.4 Boucle de contrôle simplifiée de la force
Tirée de la documentation d'ABB [1]

La différence entre la force mesurée et la force désirée est divisée par le paramètre d'amortissement ($1/D$) comme l'illustre la *Figure 5.4*. L'unité de la valeur qui résulte de cette opération correspond à une vitesse (m/s). Or, lors d'une trajectoire en force, une correction est constamment nécessaire pour appliquer une force constante. Ce paramètre agit donc dans la direction de la force en commandant une vitesse vers la matière si la force mesurée est inférieure à la force désirée et vice versa. Un filtre passe bas (LP) est aussi utilisé pour éliminer du bruit dans le signal. La valeur par défaut est définie à 3 Hz pour un contact rigide métal à métal.

TimeOut

Ce paramètre correspond tout simplement au temps (en seconde) limite pour atteindre la force lors de l'entrée. Si la force n'est pas atteinte, le programme continue à l'instruction suivante.

UseSpdFFW

Ce paramètre doit être utilisé lorsque la trajectoire est complexe sans quoi seul de contrôle de force est utilisé pour diriger le robot. En utilisant ce paramètre, le robot utilise la direction de la trajectoire pour s'orienter et utilise le contrôle de force dans la direction prédéterminée de la force. Généralement, en contrôle, le paramètre de *feed forward* (FFW) sert à contrôler le dépassement initial du signal, i.e. dans le cas présent l'entrée en matière.

Certains de ces paramètres servent uniquement sur l'entrée tandis que d'autres servent durant la trajectoire. Les instructions de la trajectoire en contact sont des FCPRESS et le seul paramètre de force qu'il est possible de modifier sur cet instruction est la force à appliquer elle-même. Tous les autres sont fixés lors du FCPRESS1LSTART et ne peuvent changer durant la trajectoire. À la fin de la trajectoire, il y a une instruction pour le retrait de la matière, soit le FCPRESSEND. Deux paramètres sont disponibles pour contrôler la sortie.

ForceChange

Ce paramètre contrôle la vitesse de retrait de la force. L'unité de ce paramètre est en N/s. Ce paramètre agit dans la direction opposée de la force pour exécuter le retrait.

ZeroContactValue

Ce paramètre correspond à la force définie comme étant le seuil de non contact. Lors de la sortie, dès que la force ressentie sera moindre que la valeur de ce paramètre, le contrôleur du robot désactivera le contrôle de force et effectuera le retrait en position de l'instruction suivante.

Les paramètres accessibles du contrôle de force sont maintenant définis. Étant donné que le référentiel dynamique de force sera utilisé pour l'ébavurage de plusieurs géométries,

quelques précisions sont nécessaires pour comprendre sa création puisque ce référentiel a un impact sur la programmation ainsi que le choix des méthodes d'usinage. Le référentiel dynamique a besoin de plusieurs paramètres pour se construire. La direction X du référentiel (X_F) de force est la première définie. Elle correspond à la direction de la trajectoire, i.e. la tangente à la trajectoire en un point qui se traduit par la droite qui passe par deux points successifs de la trajectoire, soit le point actuel et le suivant. Ensuite, la direction Y_F ($X_F \times Z_T$) est générée par le produit vectoriel de X_F et du Z du TCP (Z_T). Finalement, la direction Z_F ($X_F \times Y_F$) complète le référentiel de force par le produit vectoriel de X_F avec Y_F . La *Figure 5.5* illustre bien la formation du référentiel de force pour un exemple spécifique.

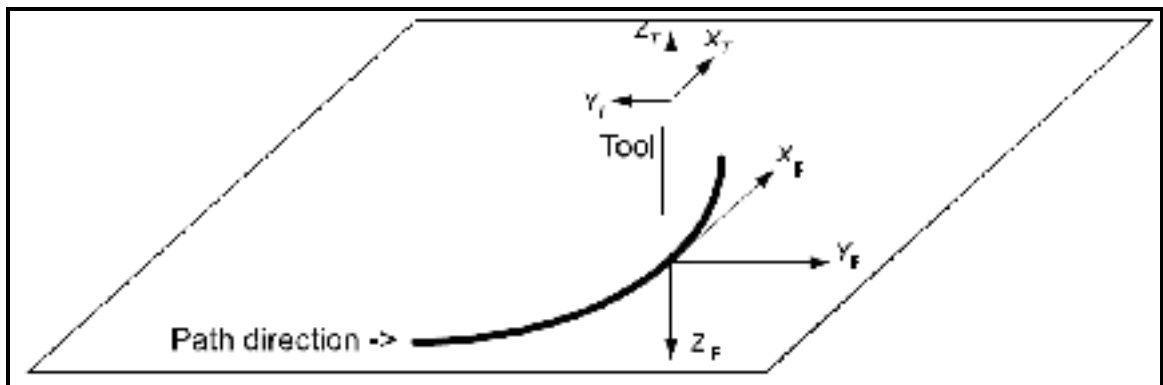


Figure 5.5 Schéma de création du référentiel dynamique de force

Avant même de définir les paramètres du contrôle de force, il faut évaluer les conditions de coupe de matière avec l'outil d'ébavurage. Certaines conditions favorisent un meilleur contrôle de la force désirée. Comme des outils de coupe sont utilisés pour l'ébavurage, certains principes d'usinage peuvent être réutilisés. Les efforts de coupe génèrent des orientations de forces différentes selon si l'enlèvement de matière se fait par opposition ou en avalant. La *Figure 5.6* illustre le principe d'usinage par opposition ainsi que les vecteurs de force créés par les efforts de coupe.

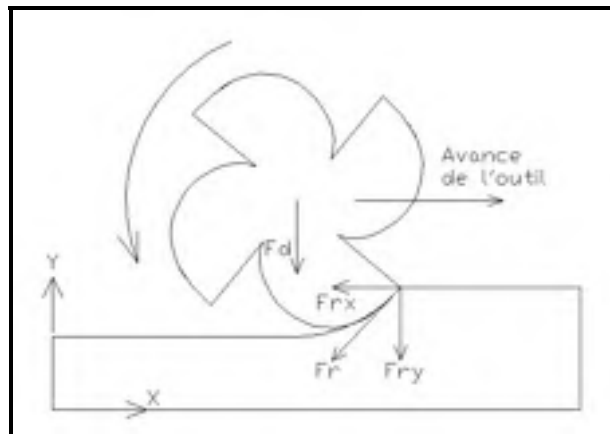


Figure 5.6 Diagramme des efforts de coupe pour la méthode d'usinage par opposition

Le principe d'usinage par opposition se traduit par une force de répulsion de la matière qui va à l'encontre de la direction d'avance de l'outil de coupe. Dans la *Figure 5.6*, pour l'application du contrôle de force, une force désirée (F_d) est dirigée vers la matière dans la direction Y^- . L'avance de l'outil est en X^+ et la rotation de l'outil est anti horaire. Hors, à la jonction de l'outil et de la matière les efforts de coupe générés par la résistance de cisaillement de la matière créés une force résultante (F_r) de réaction de la matière orientée en $[X^-, Y^-]$. Donc, la décomposition de F_r donne une composante en X (F_{rx}) qui s'oppose à la direction d'avance de l'outil. De plus, la composante en Y (F_{ry}) n'offre pas de réaction à F_d , mais pousse plutôt l'outil dans la matière dans la même direction que F_d .

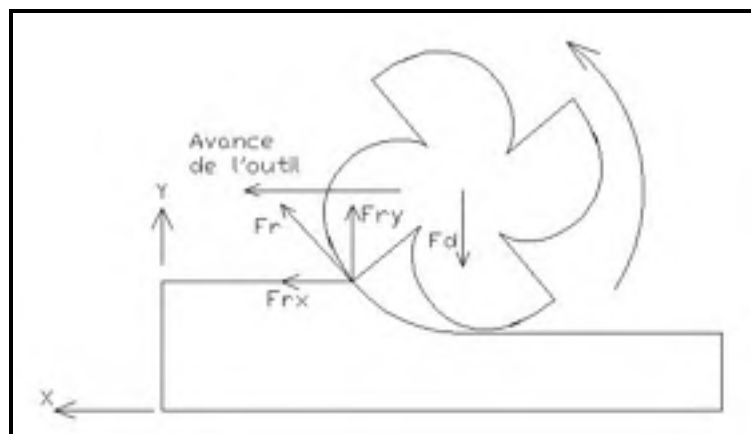


Figure 5.7 Diagramme des efforts de coupe pour la méthode d'usinage en avalant

La *Figure 5.7* illustre le principe d'usinage en avalant. Comme dans l'exemple de l'usinage par opposition, la force F_d est dirigée vers la matière dans la direction Y^- , la direction d'avance est en X^+ , puis la rotation de l'outil est anti horaire. Dans ce cas, la force résultante F_r est orientée en $[X^+, Y^+]$. Hors, la décomposition de la force montre une force en X qui pousse l'outil vers sa direction d'avance. De plus, la composante Y offre une réaction de force à F_d .

L'analyse des efforts de coupe démontre que l'utilisation du principe d'usinage en avalant est favorable à la stabilité du contrôle de force. D'une part, la composante horizontale (X) de la force de réaction n'empêche pas le mouvement de l'outil dans sa direction d'avance. D'autre part, la composante verticale (Y) de la force offre une réaction à F_d . Cette réaction est désirée afin d'atteindre une stabilité du contrôle de force. En effet, les forces désirées à appliquer sont faibles et le dimensionnel à atteindre est petit. Dans le cas de l'usinage par opposition, la composante F_{ry} aura tendance à pousser davantage l'outil dans la matière créant un dimensionnel plus gros. À ceci s'ajoute un dépassement de F_d à cause de F_{ry} engendrant une correction de répulsion de la matière. Alors, d'une part les efforts de coupe attirent l'outil dans la matière et d'autre part le contrôle de force essaye de diminuer la pénétration de l'outil dans la matière pour atteindre F_d . Cette situation crée de l'instabilité pour le contrôle de force. Le principe d'usinage par opposition ne devrait donc pas être utilisé pour une application d'ébavurage robotisée avec un contrôle de force.

Le choix de l'usinage en avalant aura des effets positifs sur le contrôle de force. De plus, il affectera la direction de la trajectoire en fonction de l'outil ou du sens de rotation de l'abrasif. La direction de la trajectoire aura une influence directe sur la formation du référentiel de force, donc sur la direction d'application de la force.

Le dernier élément à considérer après le choix des paramètres du contrôle de force ainsi que le type d'usinage est la programmation de la trajectoire, tout particulièrement l'entrée et la sortie de la matière. Tout d'abord, le choix des points de la trajectoire aura une influence,

puis la combinaison de la trajectoire et des paramètres de force dévoileront des corrélations lors de l'expérimentation.

La documentation d'ABB propose quelques pistes pour la programmation des points d'entrée et de sortie. La *Figure 5.8* illustre la façon de positionner les points comme la documentation d'ABB le propose. Tout d'abord, il faut avoir au minimum trois points d'approches. La droite qui relie les points d'approche A1 et A2 doit être idéalement perpendiculaire à la surface sur laquelle la trajectoire se trouve. Cependant, cette droite peut se trouver dans un cône de 45 degrés, ce qui permet un peu de latitude pour la programmation. Ensuite, la droite formée par les points d'approche A2 et A3 doit être le plus parallèle possible à la direction de la trajectoire et ces points doivent être *le plus près possible* de la surface.

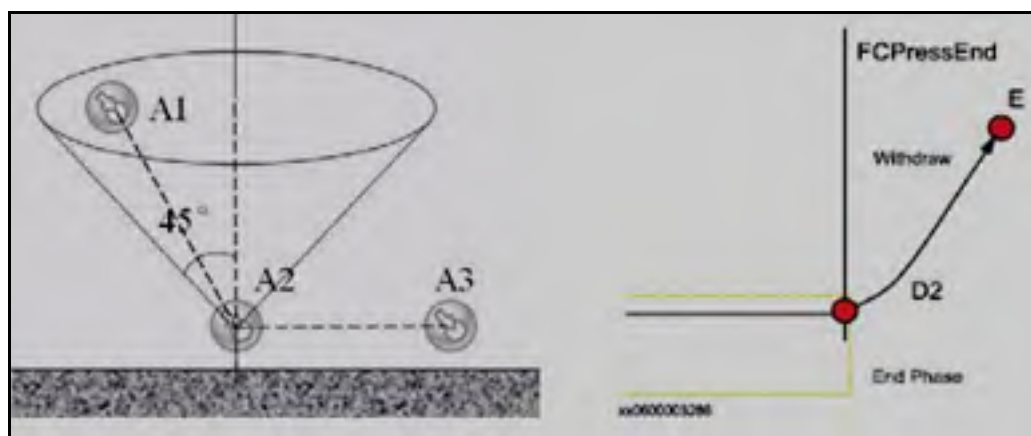


Figure 5.8 Programmation des points d'entrée et de sortie d'une trajectoire en force
Tirée de la documentation d'ABB [3]

En ce qui concerne la sortie, seul le premier point de sortie, soit le point E a de l'importance. Le mouvement horizontal vers le point E doit être *le plus court possible*. Le capteur de force cessera d'être actif lorsque la force sera inférieure à la valeur du paramètre *ZeroContactValue* ou lorsque le déplacement horizontal vers le point E sera terminé.

En réalité, il est relativement simple de respecter ces quelques règles pour des trajectoires linéaires ou peu complexes, mais dans le cas de trajectoires circulaires avec des petits rayons,

l'espace est restreint et il devient crucial de comprendre le fondement de ces règles. L'expérimentation permettra de comprendre les effets du non respect de ces règles ainsi que de définir quantitativement, pour l'application d'ébavurage du projet, ce que veut dire '*le plus près possible*' et '*le plus court possible*'.

Quelques détails supplémentaires sont nécessaires à une compréhension efficace de la génération du référentiel dynamique de force ainsi qu'au choix des points d'entrée et de sortie. Afin de faire une entrée en douceur, il est important de bien positionner les points d'approches d'après le point d'entrée. Dans la *Figure 5.9*, on voit que la droite qui passe par le dernier point d'approche et le premier point d'entrée forme un angle α avec la direction de la trajectoire.

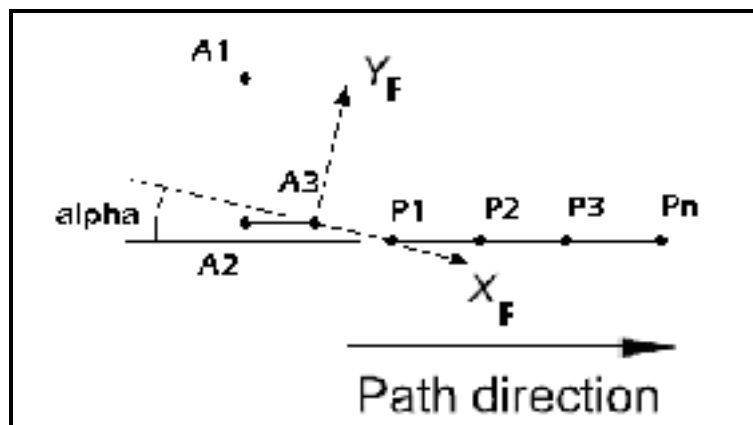


Figure 5.9 Impact de la programmation de l'entrée de la trajectoire en force

Dans cet exemple, la force devrait être appliquée selon $-Y_F$. Alors, plus l'angle α sera prononcé, plus la composante de la force dans la direction opposée à la trajectoire sera grande, moins l'entrée se fera en douceur et en contrôle. Il est donc important de choisir une position pour le point A3 qui soit près de la surface, mais aussi à une distance du point P1 qui permette l'angle α le plus petit possible selon l'espace disponible. La définition des paramètres de force pour l'entrée est décrite dans la section suivante, soit le développement expérimental à la section 5.3.2.

En ce qui concerne les points de la trajectoire, ils doivent être le plus près possible de la trajectoire réelle, sinon aucune mention particulière n'est faite quant au nombre ou à la proximité des points pour les cas de trajectoires complexes qui comportent beaucoup de courbures. L'expérimentation permettra d'établir quelques faits à ce sujet.

Ensuite, il faut s'attaquer à la sortie pour laquelle la position du premier point de retrait est importante. Pour commencer, observons la *Figure 5.10* pour analyser la position du point de retrait.

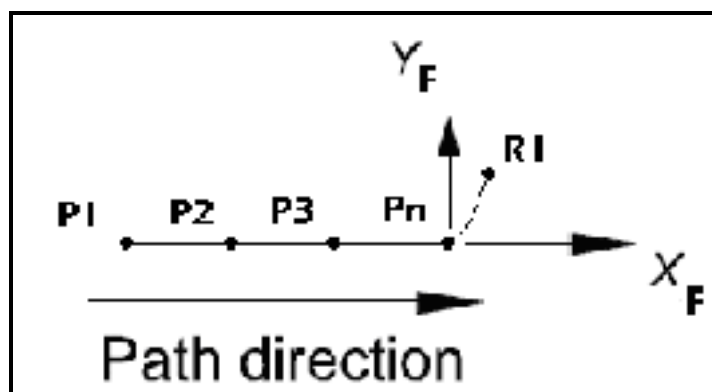


Figure 5.10 Impact de la programmation sur la sortie de la trajectoire en force

Le premier point de retrait (R1) se doit d'être près de la surface de travail, près du dernier point en contact (Pn) de la trajectoire et à une courte distance horizontale, en l'occurrence la direction X qui est perpendiculaire à la force. La raison pour laquelle ce point doit respecter ces conditions de positionnement est que dès que le robot aura atteint cette position, l'application de la force sera désactivée et c'est effectivement ce qui est souhaité. Dans le cas d'une trajectoire circulaire qui se boucle sur elle-même, l'entrée et la sortie sont au même point. Étant donné que l'enlèvement de matière est terminé au dernier point de contact, le robot ne doit pas rester à cet endroit trop longtemps pour éviter que l'outil entre dans la matière et sur ébavure. Il y a des conditions fixées par les paramètres de force de sortie qui doivent être respectées. Il y a deux paramètres de force pour la sortie et ils sont tous deux très importants à définir correctement. Premièrement, il y a le *ZeroContactValue* qui correspond au seuil de force en-deçà duquel la force sera désactivée lors de la sortie. Cette valeur peut

donc être élevée afin de s'assurer que le robot fasse sa sortie dès qu'il arrive au dernier point de la trajectoire. Deuxièmement, il y a le *ForceChange* qui définit la vitesse à laquelle la force est retirée. Une sortie rapide nécessite une valeur élevée, mais une valeur trop élevée pourrait engendrer un choc, donc de la vibration.

Le développement expérimental permettra de bien comprendre l'influence de chacun des paramètres de force ainsi que de la programmation. De plus, les effets combinés de plusieurs paramètres seront aussi analysés afin d'établir une méthode de définition des paramètres de force basée sur la théorie et l'expérimentation. Aussi, des méthodes de programmation seront définies et la précision de positionnement nécessaire au bon contrôle de la force sera aussi évaluée dans le cadre d'une application spécifique du projet.

5.3.2 Développement expérimental

La section de développement expérimental a pour but de faire la sélection des paramètres de force pour une application d'égouttage robotisé de précision. Chaque application a ses particularités et, de ce fait, nécessitera une combinaison particulière des paramètres de force. Le développement suivant se veut général dans l'utilisation d'un robot avec un contrôle de force pour une application d'égouttage de précision avec des outils rigides. Le développement débute avec un plan d'expérimentation qui permettra de tester une multitude de combinaisons de paramètres de force. Par la suite, un raffinement sera fait pour trouver la combinaison optimale. Puis, une analyse sera conduite pour évaluer les facteurs influents sur le contrôle de force. Finalement, quelques expérimentations permettront de définir les limites du contrôle de force par rapport à la somme des imprécisions discutées au chapitre 2 et les effets que cela peut engendrer sur les résultats d'égouttage. Pour compléter à l'utilisation d'une technologie adaptative comme le contrôle de force logiciel, un outil à compensation pneumatique servira de comparatif pour évaluer la performance du contrôle de force logiciel dans une application d'égouttage robotisé de précision.

DÉFINITION DES PARAMÈTRES DE FORCE

Pour débiter la sélection des paramètres de force, il faut établir un plan d'expérimentation qui permettra de couvrir la plage de valeurs possibles pour chacun des paramètres dans différentes combinaisons. Un seul paramètre varie à la fois afin d'évaluer son effet unique, puis son effet combiné en corrélant plusieurs tests. Les tests seront effectués sur une trajectoire circulaire puisque cela représente bien l'utilisation ciblée pour le contrôle de force dans le projet. La trajectoire sera la même pour tous les tests. Enfin, l'outil ne sera pas mis en rotation dans cette série de tests pour limiter les bruits au capteur qui pourraient altérer l'analyse de l'effet des paramètres de force. Voici les paramètres du plan d'expérimentation présentés au *Tableau 5.2*.

Tableau 5.2 Plan de test pour déterminer l'influence des paramètres de force sur la trajectoire en contact

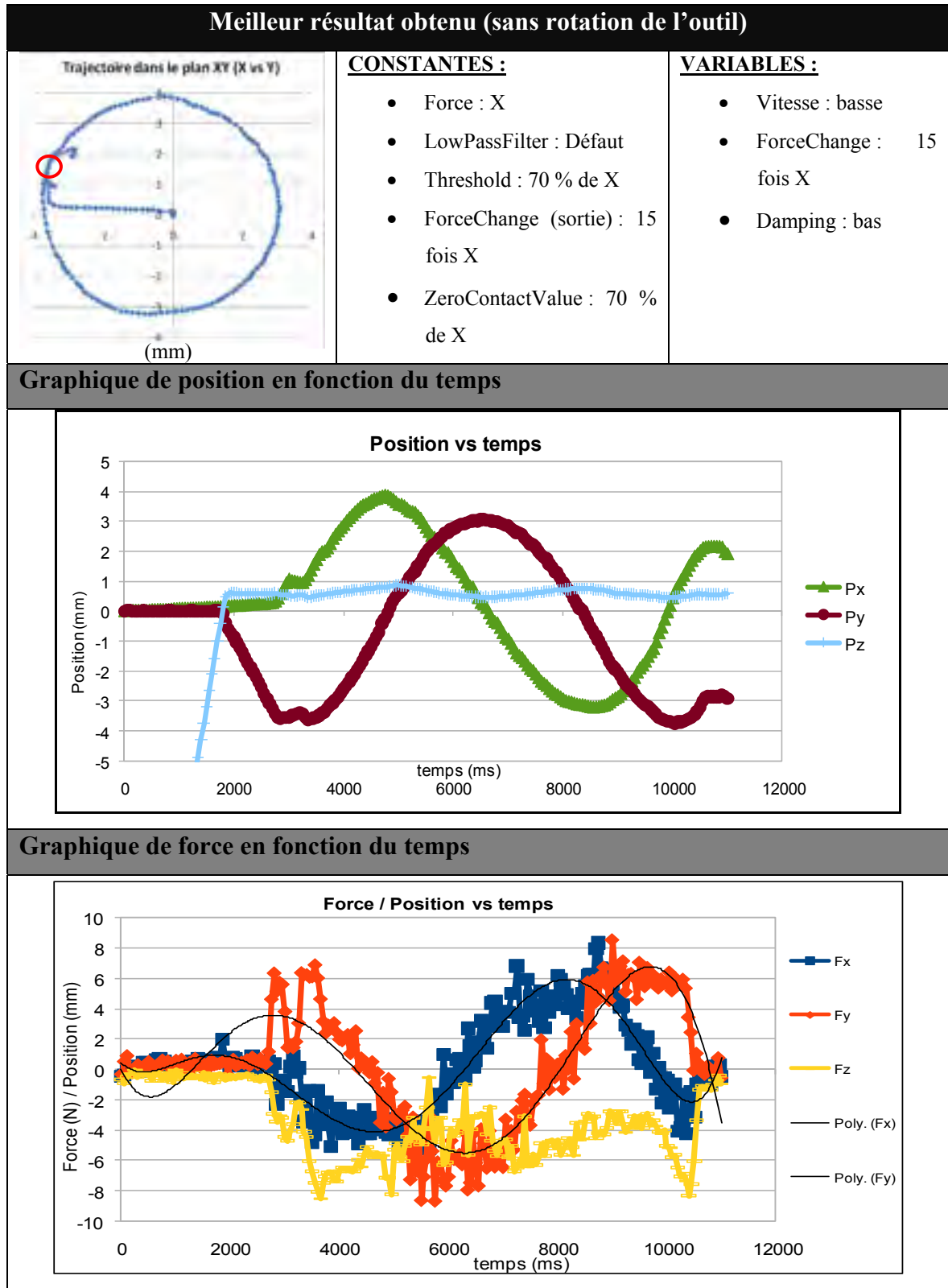
FCPRESSILSTART	
CONSTANTES	
Force	[N]
Low Pass Filter	[Hertz]
Threshold	[%] de la force
VARIABLES	
Vitesse	[3, 5, 10] mm/s
ForceChange	[5, 10, 50, 100] N/s
Damping	[50, 100, 500] N s/m
FCPRESSEND	
CONSTANTES	
ForceChange	[N/s]
ZeroContactValue	[N]

L'objectif de cette série de tests est d'évaluer l'effet des paramètres sur la stabilité du contrôle durant le contact de l'outil avec la matière. L'entrée et la sortie de la matière seront testées indépendamment par la suite. Les paramètres fixés pour l'entrée et la sortie l'ont été d'après quelques expériences préliminaires et selon les conseils d'un expert d'ABB en contrôle de force. Cependant, le *ForceChange* propre à l'entrée a été ajouté aux variables pour s'assurer que son effet n'entraîne pas une combinaison instable sur l'entrée qui pourrait mener à une instabilité sur le reste de la trajectoire.

Ce plan d'expérimentation comporte donc 36 tests. Dans un premier temps, les paramètres ayant un impact uniquement sur l'entrée et la sortie ont été fixés. L'objectif est de trouver d'abord des paramètres de force qui conviennent à un bon contrôle sur la trajectoire d'ébavurage et d'analyser ensuite l'entrée et la sortie.

Les expérimentations ont révélées quelques combinaisons de paramètres sur la trajectoire qui offrent un bon contrôle de la force désirée ainsi qu'une trajectoire fluide. Il est tout de même possible de distinguer une combinaison qui paraît meilleure que les autres ainsi qu'une combinaison qui paraît pire que les autres. À priori, la combinaison qui comporte les paramètres aux valeurs les plus élevées offre les pires résultats. La combinaison qui comporte les paramètres aux valeurs complètement à l'opposées, i.e. les valeurs minimales, n'offre pas un résultat prometteur non plus. Comme l'objectif avec le robot est de reproduire une tâche effectuée par un humain, il faut donner au système de la rigidité afin qu'il suive une trajectoire tout en laissant de la latitude pour l'adaptabilité. Le système doit donc être amorti, mais pas sur amorti. De plus, étant donné que la charge de calcul est très grande, il faut alléger le calculateur en exécutant la tâche à une vitesse qui lui permette de supporter l'effort de calcul.

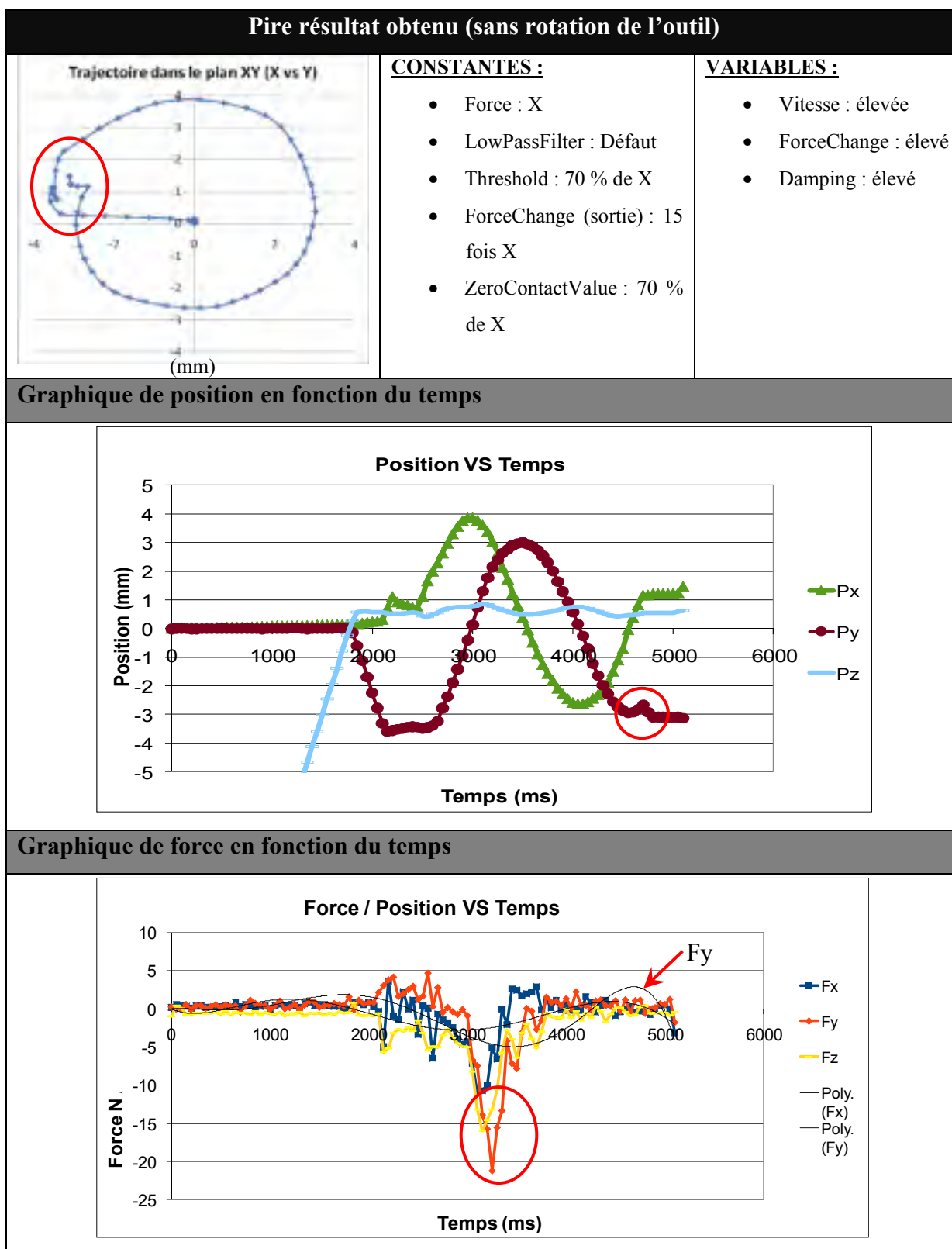
Tableau 5.3 Meilleur résultat obtenu pour le contrôle de force



Les combinaisons les plus prometteuses se situent dans les valeurs moyennes des paramètres. La meilleure solution est présentée dans le *Tableau 5.3*. Ce tableau décrit la combinaison des paramètres du test et trois graphiques illustrent le résultat. En premier lieu, la trajectoire dans le plan XY montre une trajectoire bien circulaire avec une continuité entre l'entrée et la sortie de la matière (encerclé rouge). Le graphique de la position en fonction du temps montre une fluidité dans le déplacement du robot. Étant donné que la trajectoire est circulaire, l'attente était d'obtenir deux courbes sinusoïdales déphasées d'un quart de période, donc une courbe sinus et une cosinus. Le départ est linéaire, puis l'entrée se produit entre 3000 ms et 3500 ms. L'attente pour les courbes de force était identique, soit deux courbes sinusoïdales déphasées. La tendance est bien suivie, particulièrement dans la direction X où l'application de la force se fait graduellement en avançant sur la trajectoire. La force en Y est légèrement plus brusque et saccadée parce qu'elle est moins graduelle. Somme toute, sa tendance ressemble à une courbe sinus.

La combinaison la moins prometteuse est présentée au *Tableau 5.4*. Elle est composée des paramètres ayant tous les valeurs les plus élevées du plan de test. Le graphique de la trajectoire dans le plan XY démontre une grande difficulté pour l'entrée et la sortie de la matière (encerclé rouge). Le reste de la trajectoire suit tout de même un cercle. Le graphique de la position en fonction du temps démontre une difficulté particulièrement sur la sortie (encerclé rouge), mais une fluidité sur le reste de la trajectoire. Par contre, le graphique de force en fonction du temps illustre un contrôle désastreux de la force sur la trajectoire. Si l'outil avait été en rotation pour faire un enlèvement de matière et que le graphique de force avait ressemblé à celui-ci, le résultat aurait été hors de contrôle.

Tableau 5.4 Pire résultat obtenu pour le contrôle de force



Les *tableaux 5.5 à 5.7* illustrent, par des graphiques de position et de force en fonction du temps, les effets de chacun des trois paramètres variables. Chaque graphique fait un comparatif entre la valeur maximale et minimale en question tout en fixant les autres paramètres sur la meilleure combinaison présentée précédemment.

En premier lieu, la vitesse a un effet évident sur le contrôle de la force. Plus l'exécution de la routine est rapide, moins le contrôle de force a de temps pour réagir. Les dépassements de force sont plus grands, donc les corrections aussi. Les oscillations harmoniques ont alors des amplitudes plus prononcées. Au final, la tendance sinusoïdale des courbes de force en X et Y est moins bien respectée à 10 mm/s. Par contre, les courbes de position en fonction du temps suivent une tendance sinusoïdale bien définie même à 10 mm/s. Elles sont légèrement plus compressées étant donné que la période est plus courte. Une vitesse plus lente, comme 3 mm/s, est définitivement un meilleur choix pour obtenir un contrôle de force défini et un suivi de trajectoire fluide.

En second lieu, l'effet du *ForceChange* entre 5 N/s et 100 N/s n'est pas très notable. Les courbes de position sont très similaires et fluides tout comme le sont les courbes de force. Aucune situation instable ne s'est présentée, dont aucun effet n'a été noté sur la trajectoire en contact. Cependant, en théorie, s'il survenait une situation de dépassement de la force sur l'entrée, un *ForceChange* plus élevé permettrait de corriger la situation plus rapidement.

En dernier lieu, le paramètre d'amortissement (damping) semble offrir de très bons résultats tant à 50 Ns/m qu'à 500 Ns/m, même que les courbes de position sont légèrement plus fluides à 500 Ns/m. Par contre, il faut se souvenir qu'une valeur élevée d'amortissement signifie un système rigide et peu sensible au contact ressenti. Sur les graphiques, tout semble parfait. Par contre, lors du test, il a été observé qu'une valeur élevée d'amortissement comme 500 Ns/m rend le système rigide au point que le robot ne réagit pratiquement pas au contact de force. Il suit plutôt la trajectoire programmée sans s'adapter dans la direction de la force. Étant donné que la trajectoire est programmée très près de la trajectoire physique et que le positionnement de la pièce a été fait précisément, il n'y a pas de sommet de force démesuré

apparent sur le graphique. Cependant, en réalité il y avait un petit décalage de positionnement de la pièce et l'outil n'a fait contact que sur la moitié de la trajectoire. L'autre moitié s'est déroulée dans le vide.

Tableau 5.5 Effet de la vitesse sur le contrôle de force

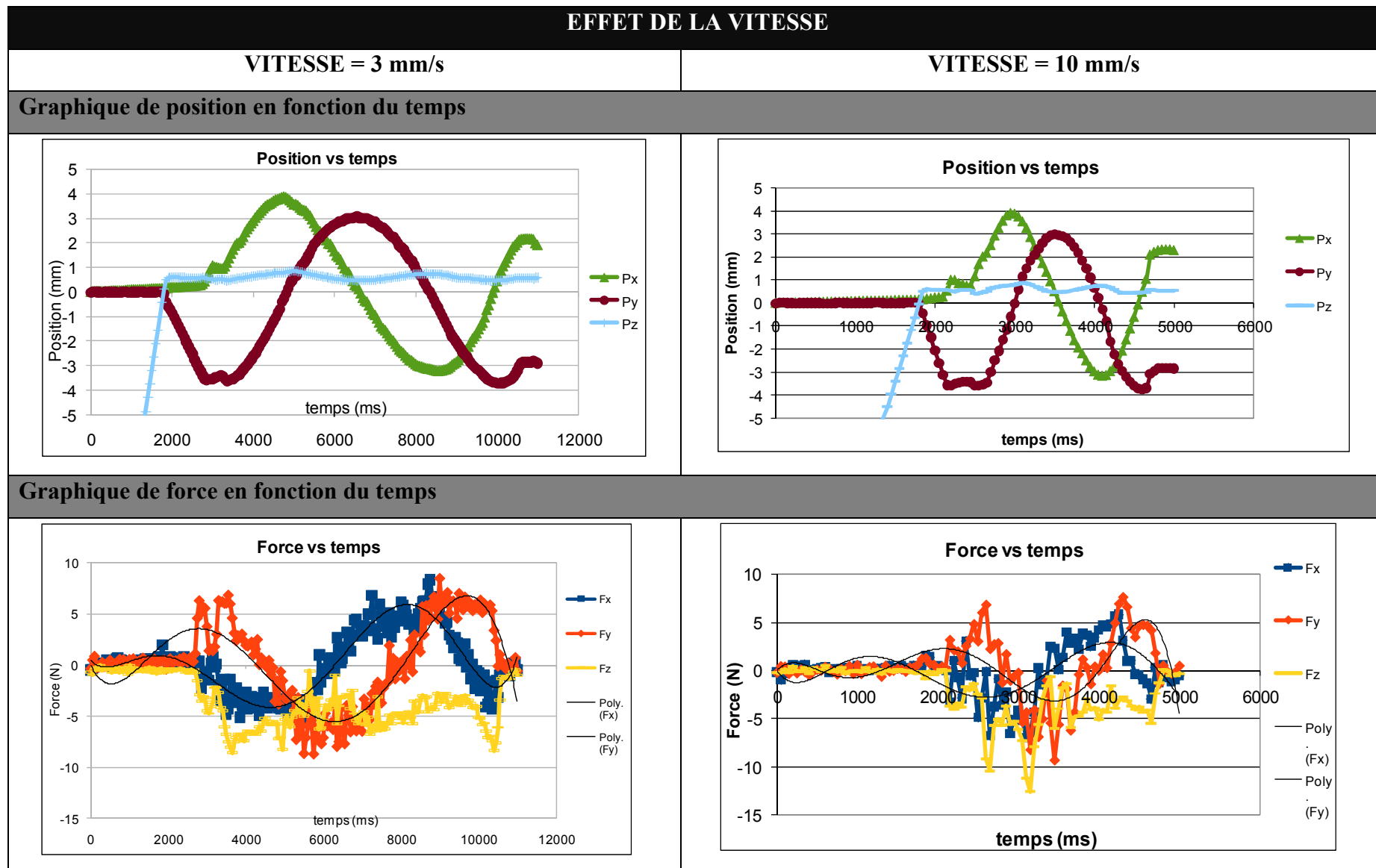


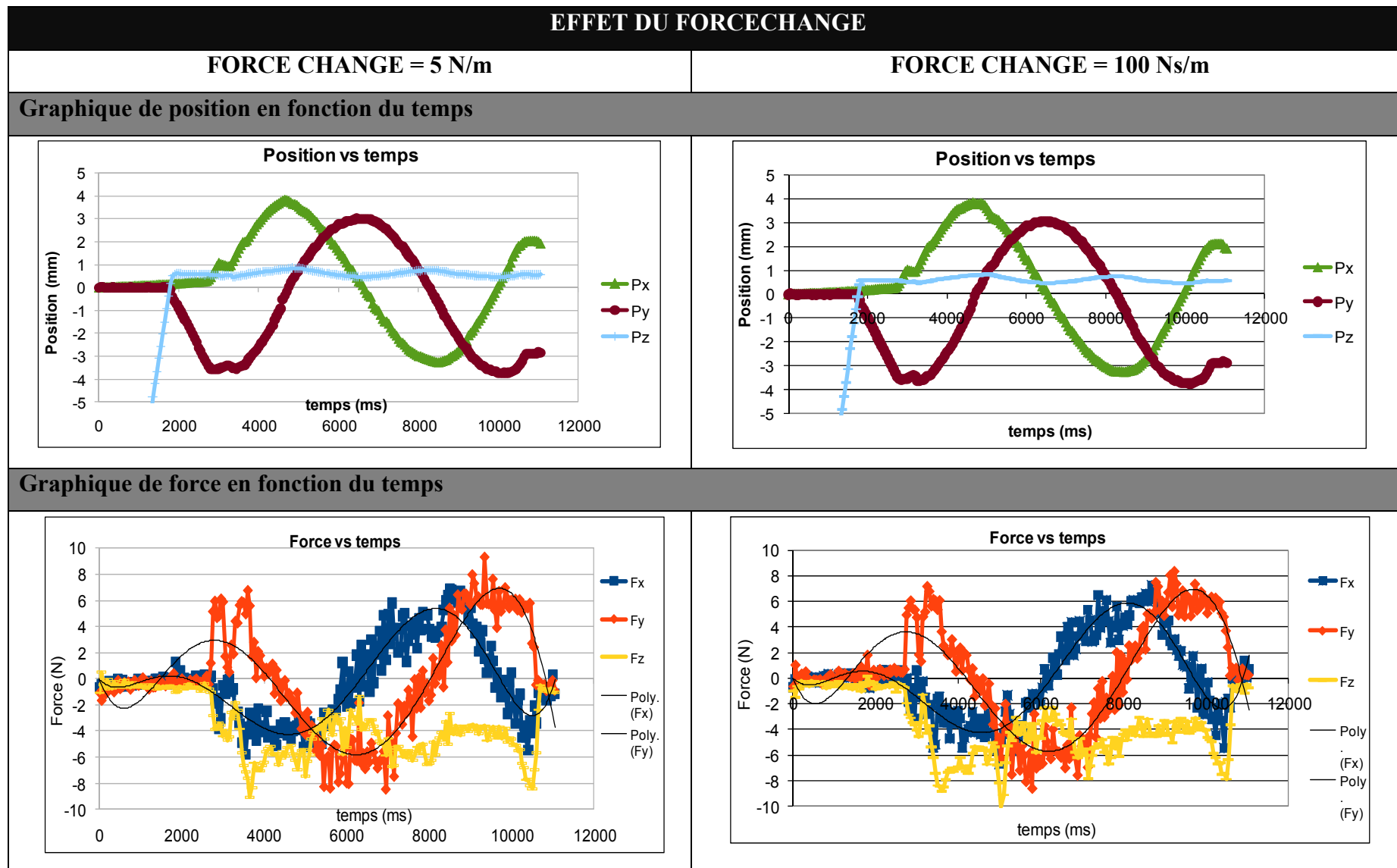
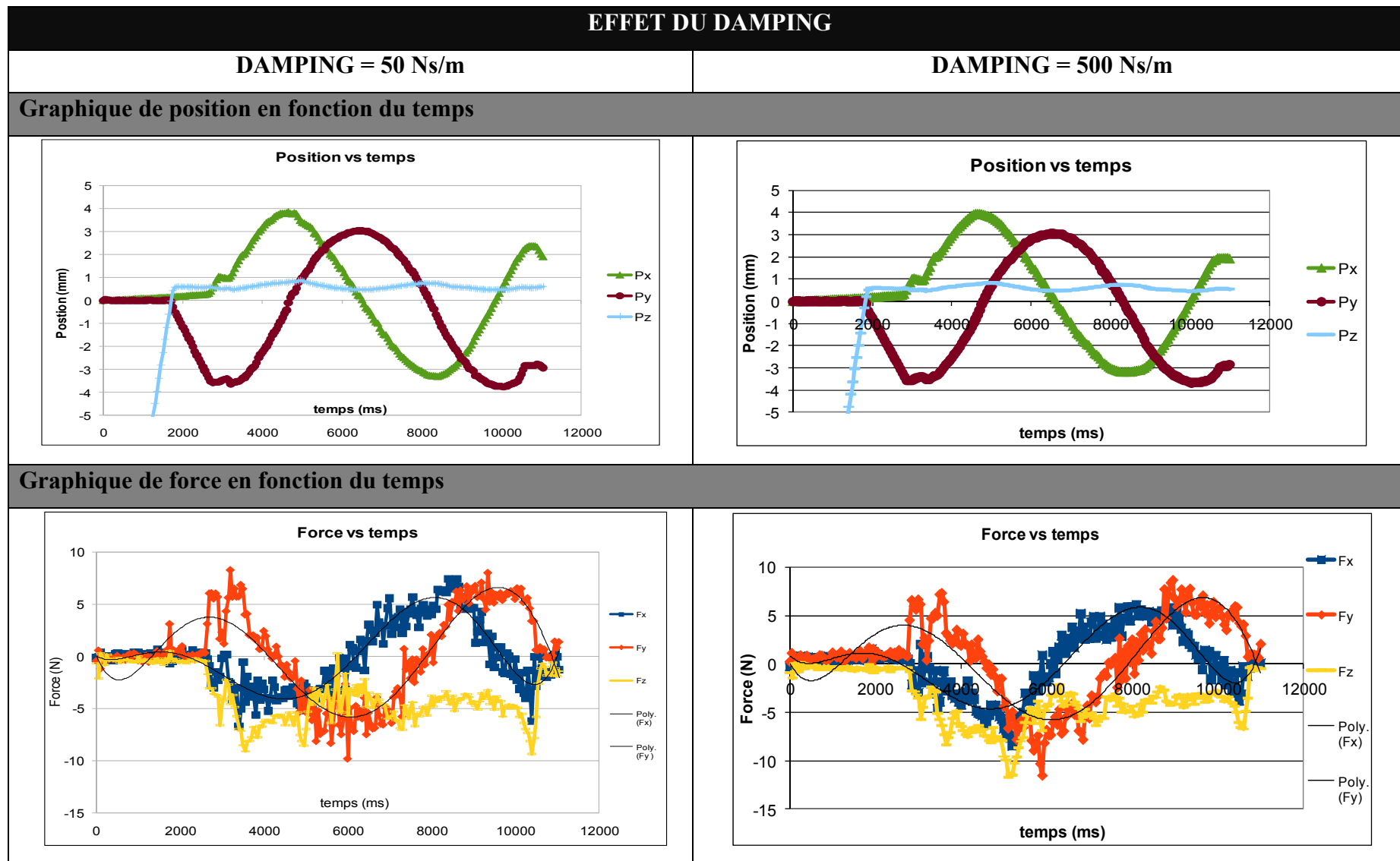
Tableau 5.6 Effet du *ForceChange* sur le contrôle de force

Tableau 5.7 Effet du *damping* sur le contrôle de force

Une combinaison optimale pour les paramètres sur la trajectoire en contact a été définie grâce au plan de test du *Tableau 5.2*. Maintenant, la définition des paramètres pour l'entrée et la sortie devra se faire avec l'outil en rotation et dans une situation d'enlèvement de matière. Ces deux phases sont critiques. L'entrée l'est pour la qualité et la constance du résultat avec le reste du chanfrein, mais aussi pour assurer une trajectoire en contrôle en n'induisant pas un dépassement initial qui cause l'instabilité. Quant à la sortie, elle est critique surtout dans le cas d'une trajectoire circulaire qui débute et se termine au même point parce qu'elle doit uniformiser l'entrée et la sortie. La sortie peut gâcher un ébavurage qui était jusque là impeccable. Cette étape est donc décisive pour la qualité du résultat.

Tout d'abord, le paramètre influent l'entrée est le seuil (threshold). Sur l'entrée, dès que le seuil de force est atteint (pourcentage de la force désirée) dans la direction de la force désirée, le robot se déplace vers le premier point de la trajectoire (ce point est sur l'instruction FCPRESS1LSTART). Si le seuil est sous les 100%, 25% par exemple, il y aura une zone où la profondeur d'ébavurage ne sera pas complète. La *Figure 5.11* illustre justement cet effet de manque d'ébavurage à la jonction de l'entrée et de la sortie. L'image de gauche montre la trajectoire tandis que celle de droite montre le résultat d'ébavurage.

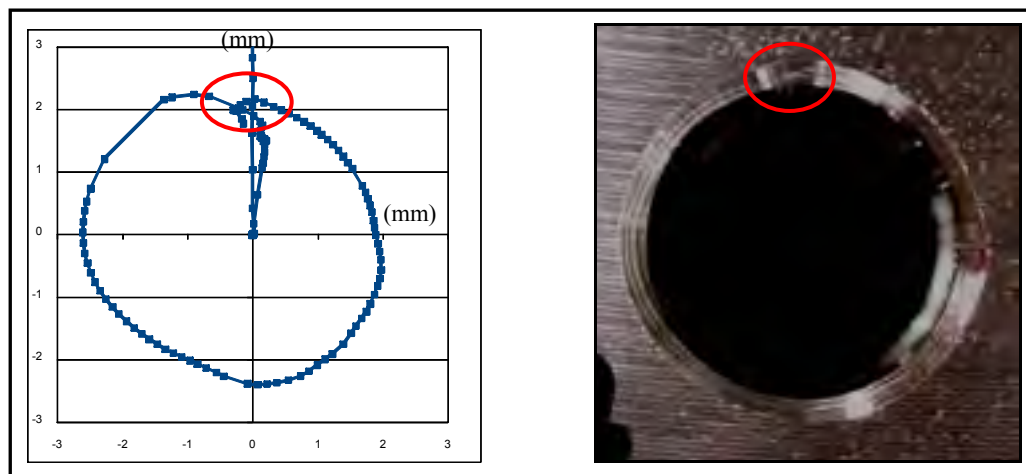


Figure 5.11 Trajectoire et résultat d'ébavurage pour un seuil de 20 %

En revanche, avec un seuil à 100%, la profondeur du chanfrein sera atteinte avant que le robot se déplace vers le premier point de la trajectoire. La zone sous ébavurée disparaît lorsque le seuil est défini à 100%. La *Figure 5.12* illustre bien le résultat.

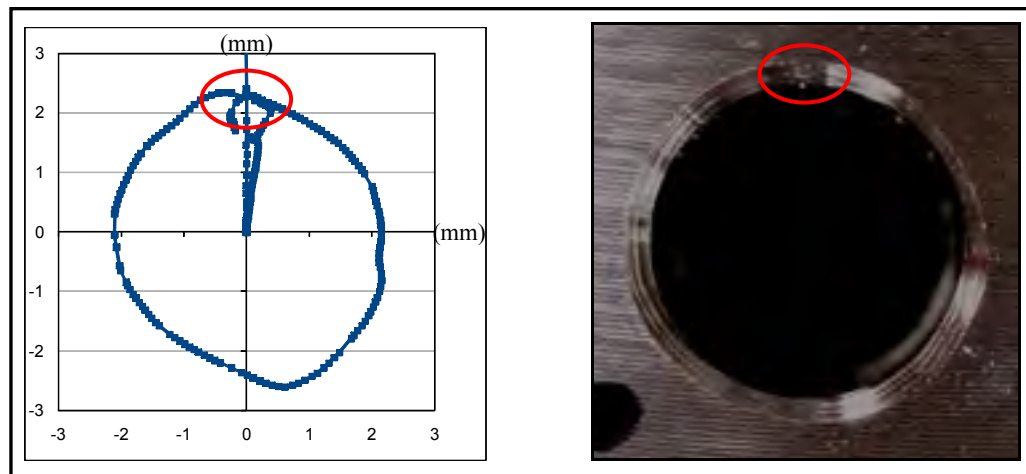


Figure 5.12 Trajectoire et résultat d'ébavurage pour un seuil de 100%

La sortie quant à elle se doit d'être rapide pour éviter de sur ébavurer la fin du chanfrein et ainsi gaspiller tout le travail. Il y a deux paramètres qui influencent la sortie. Il y a le seuil de sortie (*ZeroContactValue*) et le *ForceChange* de sortie. Ce qui est recommandé dans la documentation d'ABB est de définir le seuil de sortie à environ 50% de la force appliquée sur la trajectoire. Par contre, la réalité de l'application du projet, soit l'ébavurage avec des outils rigides, nécessite une définition différente du seuil de sortie. La force mesurée avec les multiples sources de vibration est plus grande que la force désirée qui est commandée. Ce fait est dû effectivement au vibration, mais aussi au fait que l'application d'ébavurage en cause est délicate et nécessite d'utiliser des amplitudes de force très faibles. Alors, si le seuil de sortie est défini à une valeur trop basse, cette valeur ne sera jamais atteinte puisque les vibrations à elles seules dépassent cette valeur. La valeur du seuil peut donc être définie à une valeur dépassant toutes valeurs enregistrées. La *Figure 5.13* montre à gauche le résultat pour un seuil à 100% de la force commandée et à droite un seuil à 1000% de la force commandée. Avec un seuil plus élevé, le sur ébavurage disparaît. Cependant, il y a aussi le *ForceChange* sur la sortie qui peut être redéfini pour cette instruction de retrait. Si l'amplitude de force mesurée est grande avant d'effectuer la sortie et qu'il est nécessaire de

sortir rapidement pour conserver l'intégrité du résultat, la valeur du *ForceChange* doit être augmentée. Il peut être défini selon l'amplitude de la force et le temps désiré pour effectuer la sortie.

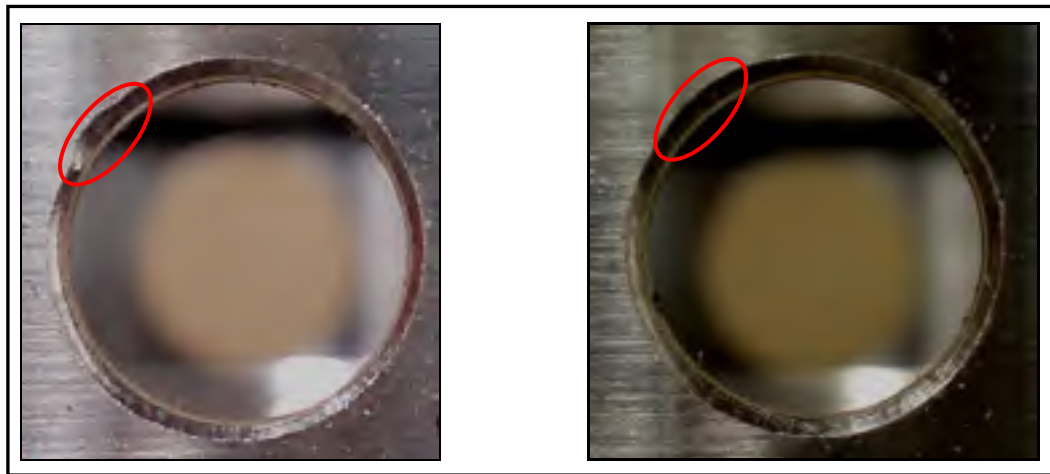


Figure 5.13 Résultat d'égavurage avec un seuil de 100% (à gauche) et avec un seuil de 1000% (à droite)

5.3.3 Facteurs influents le contrôle de force et les résultats d'égavurage

Plusieurs facteurs, dont les paramètres de force influencent le contrôle de force et par le fait même le résultat d'égavurage. La programmation de la trajectoire a beaucoup d'influence sur l'entrée et la sortie de la matière, mais également sur la portion en contact. Les vibrations induites au capteur de force ont aussi un impact sur la qualité du contrôle de force.

Tout d'abord, l'entrée en matière de l'outil doit être fluide et atteindre la pénétration désirée pour obtenir un résultat uniforme avec le reste de la trajectoire. Il faut éviter un dépassement, mais aussi un sous égavurage. Pour éviter le dépassement ou le sous égavurage, il est préférable de définir un seuil d'entrée (*threshold*) à 100%. De cette façon, l'outil pénètre avec la même force qu'il conservera pendant toute la trajectoire. Ensuite, la fluidité de l'entrée passe beaucoup par la programmation. Le positionnement des points sur l'entrée a un effet sur le contrôle de la force et sur le résultat d'égavurage. Comme il a été mentionné dans le développement théorique, l'angle d'entrée ne doit pas être trop prononcé pour que

l'application de la force soit dans la bonne direction. Si l'angle alpha est trop prononcé, la composante dominante de la force est dans la direction opposée à la trajectoire (se référer à la *Figure 5.9*). Cette mauvaise orientation de la force cause un choc sur l'entrée qui se traduit concrètement par un rebond de l'outil. Ce qui se passe c'est que lorsque le seuil de force est atteint le contrôle de la position dans la direction de la trajectoire entre en fonction et essaie de corriger l'erreur. D'une part, le robot se trouve loin de sa position désirée et, d'autre part, l'orientation du déplacement est à l'opposée du déplacement en cours ce qui crée un grand changement d'accélération, donc un choc. Si cette situation se produit, il est certain qu'à tous les coups le résultat d'ébavurage sur l'entrée sera indésirable. Les points importants à considérer pour l'entrée en contact sont donc les suivants :

1. Un seuil de force (*threshold*) sur l'**entrée** de 100%,
2. Un angle d'**entrée** peu prononcé pour s'approcher d'une force normale à la surface.

La sortie aussi est sensible pour l'obtention d'un résultat uniforme. Bien entendu, le point de sortie doit être près de la surface, mais la combinaison avec les paramètres de force est très importante. Arrivé à la fin de la trajectoire, toute l'arête est ébavurée et il ne faut pas causer un sur ébavurage au point de jonction entre l'entrée et la sortie. Il faut donc quitter la matière rapidement et désactiver le contrôle de force. Pour s'assurer d'une sortie rapide, il faut tout d'abord définir un seuil de sortie beaucoup plus élevé que la force ressentie au capteur. De cette façon, le robot n'attendra pas sur le point de sortie que la force diminue, car elle sera déjà inférieure au seuil. D'autre part, il faut augmenter le paramètre de *ForceChange* pour accélérer la sortie. De cette façon, les deux conditions à respecter pour désactiver le contrôle de force et retirer l'outil complètement seront atteintes rapidement : (1) le seuil de sortie et (2) la position du point de retrait. Il faut donc respecter deux conditions pour obtenir une sortie réussie :

1. Seuil de force de **sortie** (*ZeroContactValue*) très élevé, dix fois la force commandée;
2. *ForceChange* de **sortie** élevé pour favoriser une sortie rapide sans être instable.

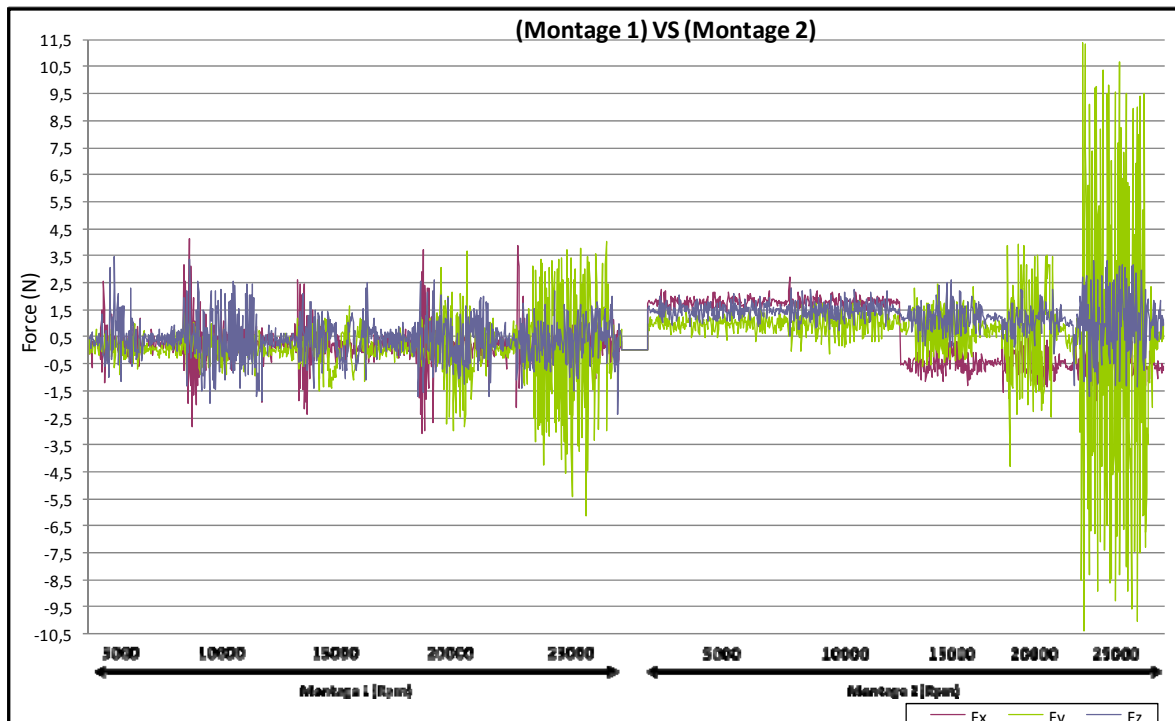
La dernière portion est celle en contact. En premier lieu, les paramètres de force doivent être définis de sorte à avoir une correction rapide des erreurs de force sans toutefois causer de l'instabilité. Le paramètre important est l'amortissement. S'il est trop élevé, le robot devient rigide et ne compense pas les erreurs de force qui doivent se traduire par un déplacement dans ou hors de la matière. S'il est trop faible, la correction sera lente et le système tombera en oscillation un peu comme une voiture qui a une suspension trop molle. Ensuite, la vitesse d'avance a une incidence sur la correction de l'erreur. Si le robot se déplace trop rapidement, il y aura trop d'information à traiter et la boucle de contrôle risque de ne pas corriger suffisamment rapidement. Une vitesse plus lente est conseillée pour un résultat uniforme. Finalement, le nombre de point sur la trajectoire est important lorsque la direction de la trajectoire change beaucoup comme dans le cas d'un cercle. Les instructions de déplacement circulaire ne sont pas très appropriées pour un contrôle adaptatif. L'arc de cercle est calculé pour chaque instruction de déplacement circulaire en utilisant trois points, soit la position actuelle et les deux points suivants. Comme la trajectoire est adaptative, la position actuelle n'est pas égale à la position programmée, donc l'arc de cercle calculé ne correspond pas à la trajectoire à suivre. L'utilisation d'instructions de déplacement circulaire avec le contrôle adaptatif a pour effet de détériorer la circularité de la trajectoire. Des déplacements linéaires courts sont plutôt utilisés. Il faut donc avoir suffisamment de point pour que les déplacements ne soient pas saccadés. Cependant, il faut faire attention à ne pas générer trop de points dans le but d'atteindre une trajectoire programmée très près de la réalité parce qu'il y a une limitation avec le robot. Il faut conserver une distance entre les points qui soit plus grande que la résolution de déplacement du robot sinon le système devient instable. Un trop petit nombre de point ne permettra pas d'obtenir une belle courbure même avec le contrôle de force puisqu'il y a toujours un contrôle de position qui s'effectue dans la direction de la trajectoire.

Finalement, les vibrations sont aussi une source potentielle de problème pour le contrôle de force. Elles peuvent bruite le signal au capteur et rendre instable le contrôle. Certaines conditions peuvent engendrer des chocs de vibration qui entraînent une correction brusque du robot. Ces conditions peuvent mener à l'instabilité et à des défauts d'ébavurage. Les sources

de vibration proviennent en partie de l'environnement ambiant du plancher de production, de la révolution du moteur qui entraîne les outils abrasifs, du battement sur les outils, des efforts de coupe lors de l'ébavurage et des trajectoires du robot lors des accélérations.

Grâce au capteur de force sur le robot, les vibrations ont été mesurées lors d'expérimentations dans le but d'évaluer l'amplitude des vibrations provenant du moteur ainsi que celles provenant des trajectoires du robot. Ces deux sources de vibration peuvent être mesurées indépendamment en faisant tourner le moteur en position statique et en simulant une trajectoire dans le vide sans rotation du moteur.

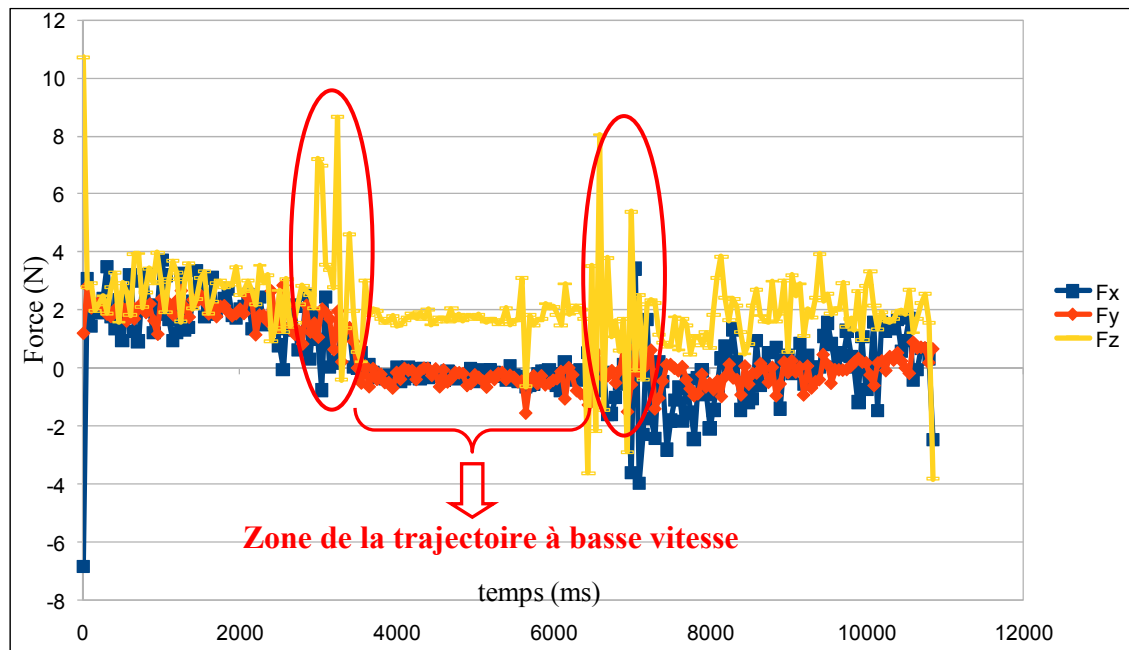
Dans un premier temps, l'impact de la rotation du moteur a été mesuré à différents paliers de vitesse disponibles. Deux montages ont été mis à l'épreuve, soit (1) le montage actuel avec un lourd moteur d'une conception de plus de dix ans monté sur un petit changeur d'outil pneumatique peu robuste et (2) un montage candidat pour remplacer l'actuel qui comporte un moteur trois fois plus léger monté sur un changeur d'outil pneumatique plus gros (deux fois plus lourd) et plus robuste. Le premier montage atteint 100% de la charge que peut supporter le robot tandis que le second atteint 70 % de cette charge. Le *Graphique 5.1* montre l'amplitude des vibrations mesurées pour les deux montages sur les cinq paliers de vitesse. Le moteur a été arrêté complètement entre chaque palier.



Graphique 5.1 Graphique comparatif de vibration des moteurs rotatifs pour deux montages

Le graphique révèle que les deux montages sont relativement similaires à l'exception du palier de vitesse à 25000 rpm où le montage 1 réagit mieux.

Dans un second temps, l'impact des accélérations durant une trajectoire a été évalué sans rotation du moteur. Le robot descend à la verticale pour ensuite suivre un cercle dans un plan horizontal, puis remonte à la verticale. Dans cette trajectoire, il y a des changements de direction et des changements de vitesse. Le *Graphique 5.2* illustre l'amplitude des forces mesurées durant la trajectoire. On peut observer tout d'abord les changements de direction de la verticale à l'horizontale (encadrés rouges) qui induisent des chocs de vibration avant et après la portion circulaire de la trajectoire. D'autre part, il y a aussi un pic de force au départ qui correspond au décollage du robot depuis une position de repos. Finalement, la portion circulaire de la trajectoire a été effectuée à basse vitesse (5 mm/s) alors que les autres déplacements ont été exécutés à plus grande vitesse (50 mm/s).



Graphique 5.2 Impact des accélérations d'une trajectoire sur les vibrations.

Quelques bonnes pratiques de programmation ressortent de cette expérimentation grâce aux problématiques notées :

1. Éviter les changements de direction brusques. Privilégier plutôt des changements de direction progressifs par l'utilisation de 'zone' dans les instructions de déplacement,
2. Éviter les déplacements à grande vitesse pour le contrôle de force lorsque l'outil est en contact avec la matière,
3. Éviter les changements de vitesse brusques. Privilégier plutôt une accélération ou une décélération progressive.

Toutes les sources de vibration cumulées auront pour effet de détériorer le contrôle de force ou d'amplifier la dimension du chanfrein puisque les vibrations s'accumulent et augmentent l'amplitude de la force appliquée. Alors, comme les vibrations ne peuvent pas être éliminées elles doivent être minimisées au maximum dans la mesure du possible.

5.3.4 Les limites du contrôle de force

L'objectif de l'utilisation du contrôle de force est de compenser les différences qui existent entre la trajectoire programmée et la trajectoire physique réelle en s'adaptant au contour réel de la trajectoire par le maintien d'une force constante dans la direction de la matière. Ces différences proviennent des tolérances de fabrication, de la précision du montage de la pièce et de la précision de positionnement du robot. Avec les paramètres optimaux trouvés pour le contrôle de force, une série de tests a été conduite pour évaluer la capacité d'adaptation du contrôle de force.

Le plan de test tente d'évaluer deux aspects du contrôle de force. D'une part, l'impact de la proximité de la trajectoire programmée avec la trajectoire réelle est évalué dans un contexte de positionnement précis. Ensuite, selon les résultats de ces tests, une trajectoire sera évaluée dans un contexte d'erreur de positionnement. Au final, une ou quelques combinaisons détermineront un seuil critique où le contrôle de force n'arrive plus à s'adapter aux conditions et fournir un résultat de qualité.

Le montage utilisé pour cette série de test est celui de la cellule robotisée prototype dont il a été question depuis le début de ce rapport. La pièce utilisée comporte des trous perpendiculaires à une surface plane. Le positionnement du robot par rapport à la pièce est fait par l'insertion d'une tige dans un des trous. Une tige de 0.250'' est montée sur l'outil rotatif du robot, puis le robot vient insérer cette tige dans le trou de la pièce qui a été mesuré à 0.253'' de diamètre. Cette méthode de localisation permet d'accumuler une erreur de positionnement ne dépassant pas 0.0015'' en X et en Y. Ensuite, comme le positionnement du robot est peu fiable, les axes auxiliaires du robot sont utilisés pour générer les erreurs de positionnement. Un axe rotatif est monté sur un axe linéaire ayant chacun une très grande résolution. La résolution de l'axe linéaire est de 999.27 pulses / mm et celle de l'axe rotatif est de 1137.82 pulses / degré.

La première série de test consiste donc à effectuer le positionnement précis du TCP de l'outil au centre du trou et à effectuer dix trajectoires à des décalages différents de la trajectoire nominale. Une première trajectoire de référence est effectuée sur le nominal. La série de test qui suit est décrite dans le *Tableau 5.8*.

Tableau 5.8 Série de test de décalage de la trajectoire programmée dans un contexte de positionnement précis

# du test	Décalage sur le rayon (mm)
1	0.1
2	0.2
3	0.3
4	0.4
5	0.5
6	0.6
7	0.7
8	0.8
9	0.9
10	1.0

Le décalage de la trajectoire programmée ne semble pas affecter négativement le résultat d'égavurage. Les résultats obtenus sont similaires pour tous les tests.

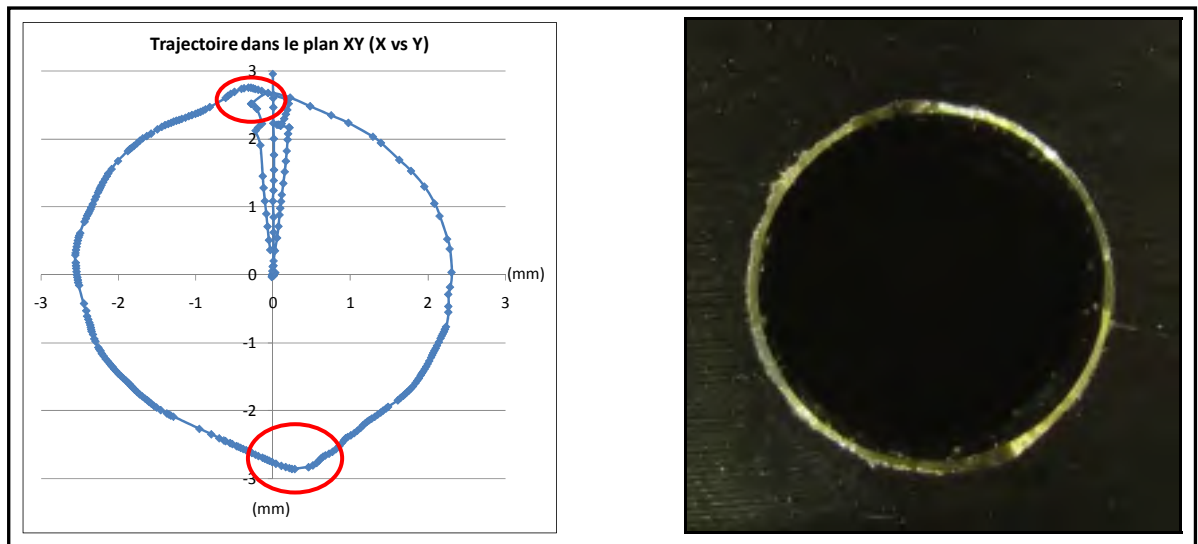


Figure 5.14 Trajectoire de référence et résultat d'égavurage associé

Le *Figure 5.14* montrent le graphique de la trajectoire ainsi que la photo du résultat obtenu pour le test de référence ayant une trajectoire programmée collée par-dessus la trajectoire physique réelle tandis que la *Figure 5.15* montre la trajectoire et le résultat d'égavurage pour le test #10 ayant un décalage d'un millimètre sur le rayon. Les résultats sont très similaires. Les graphiques des trajectoires montrent les mêmes pointes sur l'axe X (encerclés rouges) et les décalages sont aussi apparents sur l'approche. Les photos du résultat d'égavurage sont très similaires et sont fidèles à la trajectoire dessinée sur le graphique. Pour les deux tests, un sur égavurage est observé sur l'axe X qui est attribuable non pas au contrôle de force, mais aux jeux mécaniques d'assemblage qui existent dans le montage de l'outil sur le robot.

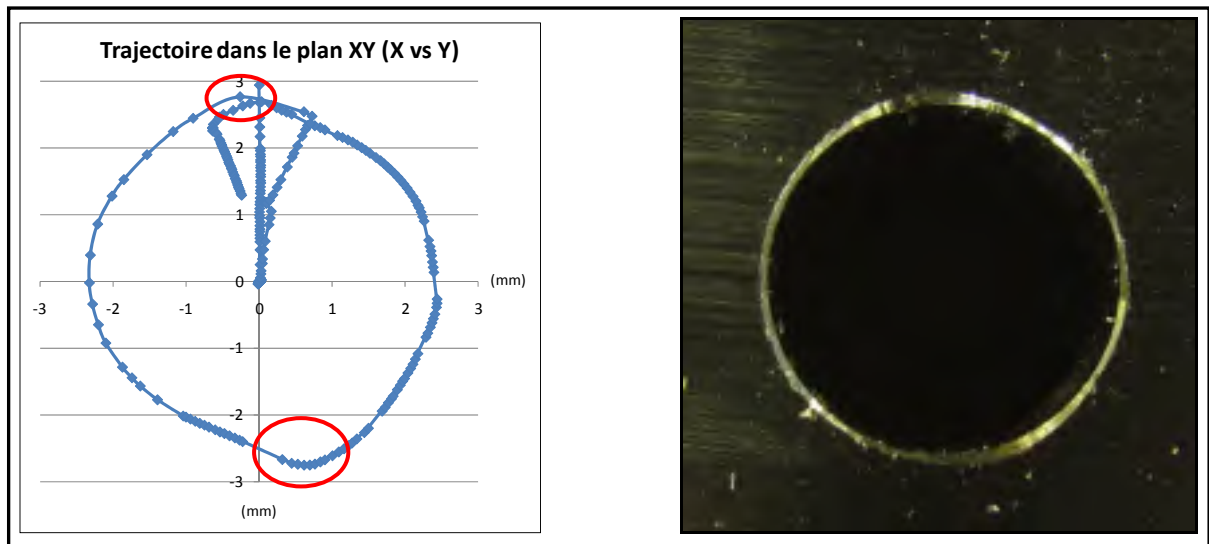


Figure 5.15 Trajectoire et résultat d'égavurage du test #10

Dans l'optique de tester les limites du contrôle de force et étant donné que les résultats d'égavurage sont bons pour la routine ayant un décalage d'un millimètre sur le rayon, les tests d'erreur de positionnement seront effectués avec la routine ayant un décalage d'un millimètre sur le rayon. La série de tests sur les erreurs de positionnement est exposée dans le *Tableau 5.9*.

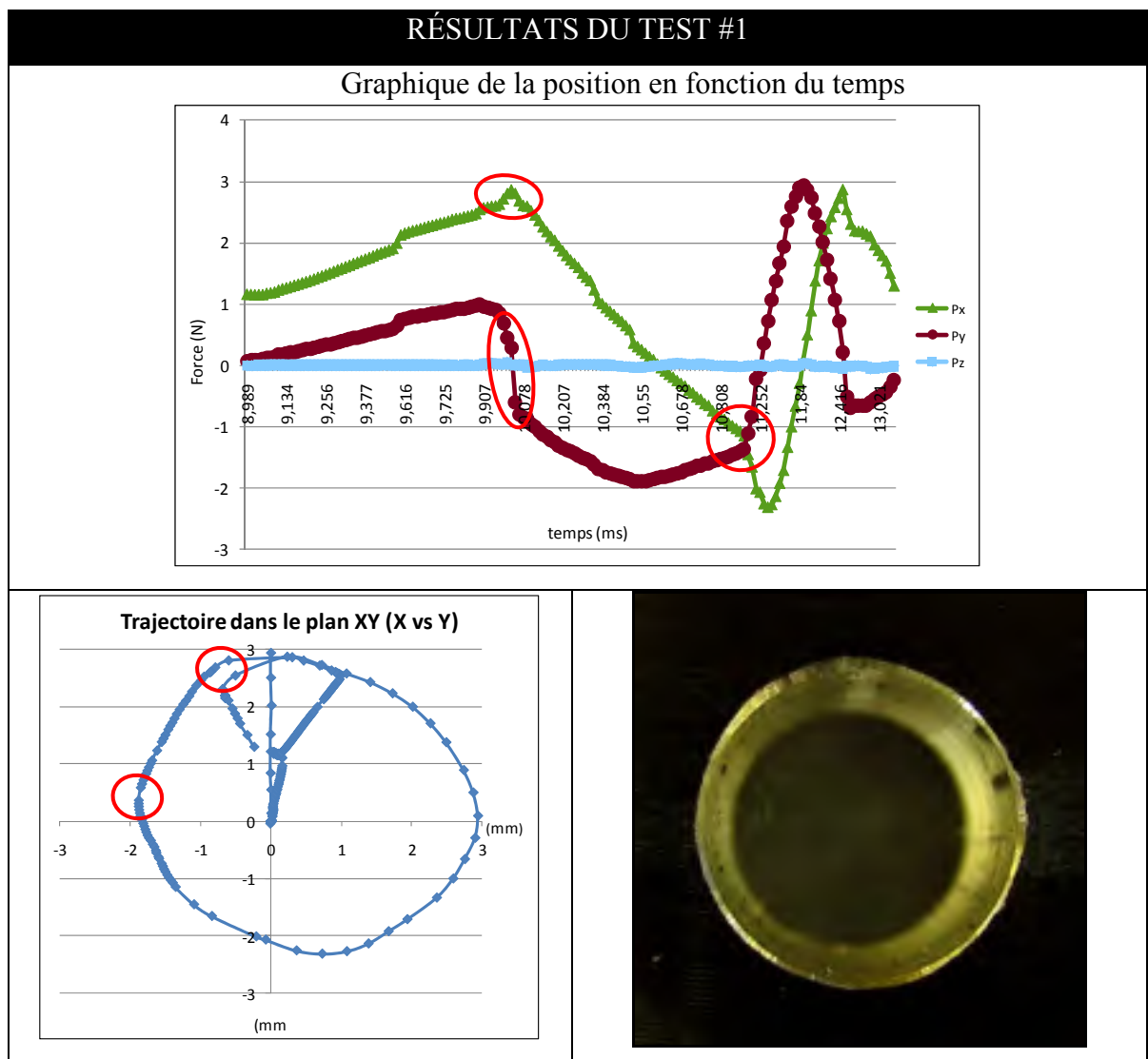
Tableau 5.9 Série de test sur l'impact de l'erreur de positionnement du robot

# du test	Décalage en X (mm)	Décalage en Y (mm)
1	-0.5	0
2	0.5	0
3	0	-0.5
4	0	0.5
5	-0.25	0.25

Le test #5 représente le décalage qui a été mesuré entre le TCP du palpeur qui localise le trou et le TCP de l'outil qui fait l'égavurage du trou. L'erreur qui existe entre ces deux TCP induit cette erreur de positionnement de l'outil d'égavurage.

Les résultats des tests révèlent que les cas où le point d'entrée programmé s'éloigne du point d'entrée physique prévu, comme c'est le cas des tests # 1 et #3, présentent des résultats non constants. À l'opposé, les tests #2 et #4 ont donnés de bons résultats en contrôle.

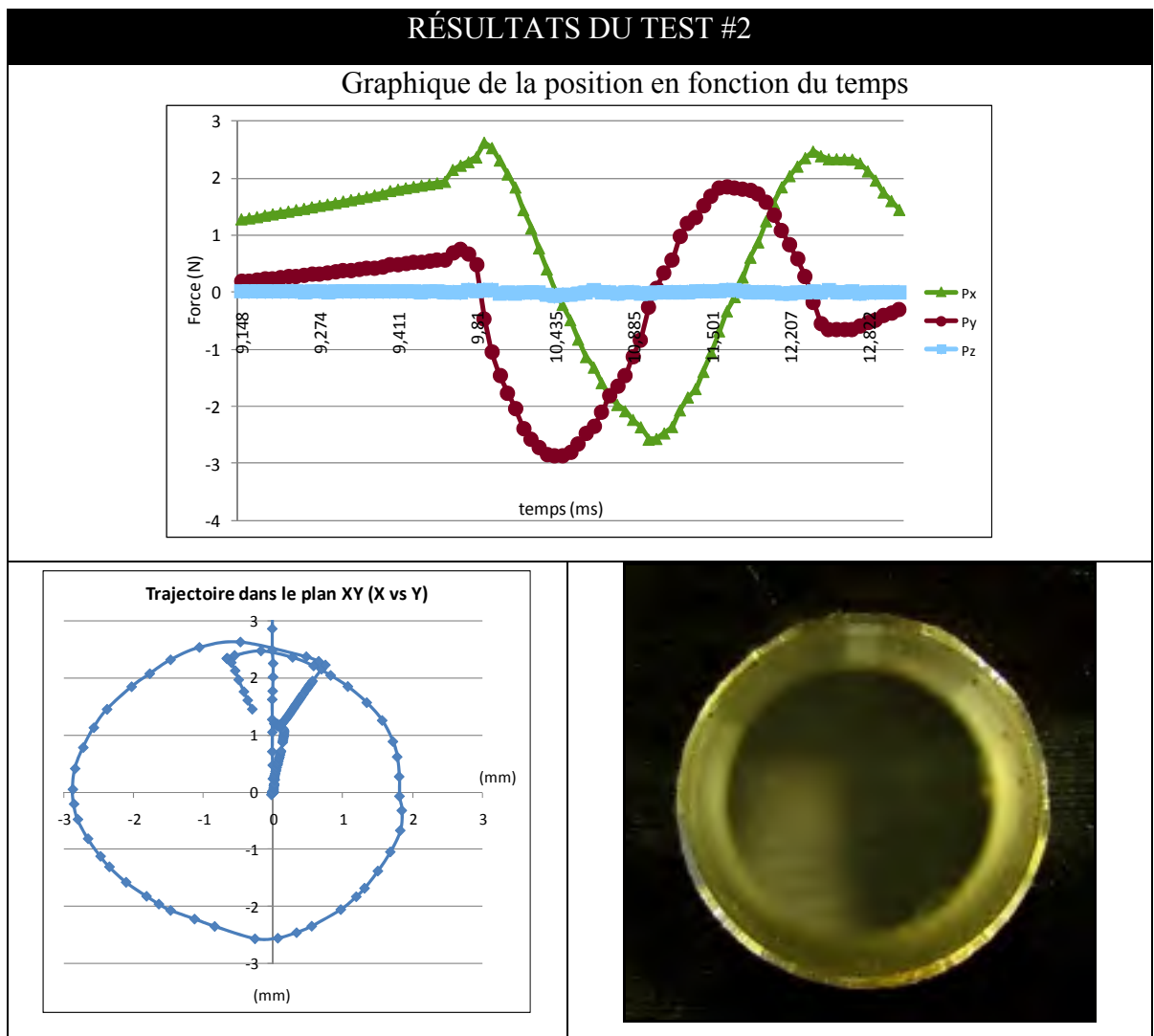
Tableau 5.10 Résultats du test #1



Le test #1, présenté au *Tableau 5.10*, révèle plusieurs discontinuités et linéarités sur les courbes de position en fonction du temps. Sur le graphique de la trajectoire, les linéarités sont visibles et il semble y avoir un sur ébavurage après l'entrée. La photo du résultat révèle un chanfrein qui n'est pas constant. Le trou est effectivement plus ébavuré sur la portion qui

succède l'entrée tandis qu'une linéarité est visible sur le troisième quart du trou. Pour sa part, le test #2, présenté au *Tableau 5.11*, révèle que les discontinuités sur la position ont disparues. La trajectoire est fluide et plutôt circulaire. L'ébavurage du trou s'avère être relativement constant.

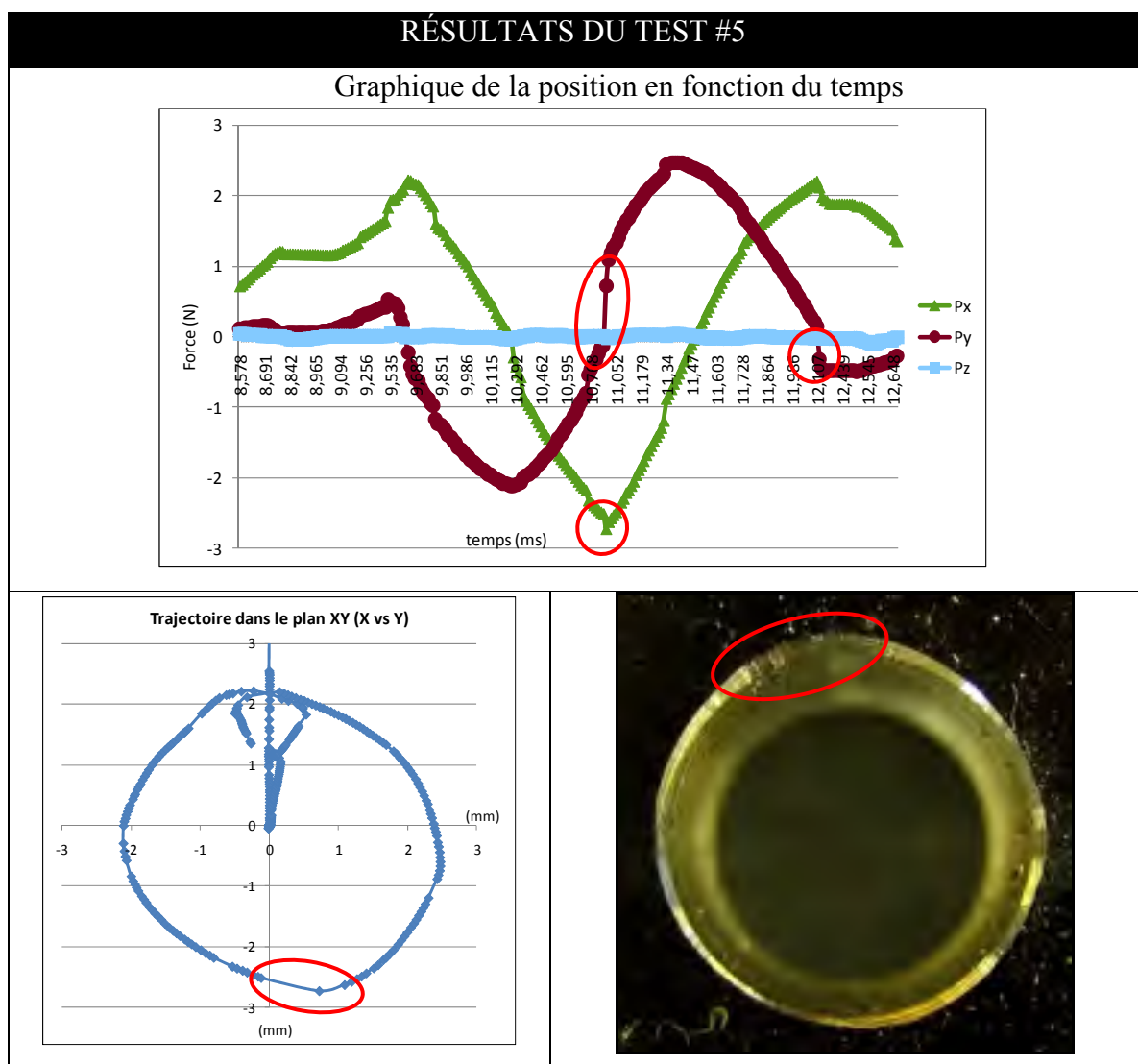
Tableau 5.11 Résultats du test #2



Finalement, le test #5, présenté au *Tableau 5.12*, a été conduit pour évaluer le contrôle et le résultat d'ébavurage dans des conditions qui correspondent à l'erreur de positionnement mesurée actuellement sur la cellule robotisée prototype. Il s'avère que la condition d'erreur

de positionnement éloigne, dans la direction X, le point d'entrée programmé du point d'entrée physique réel. Pour cause, les courbes de position en fonction du temps révèlent plusieurs discontinuités et linéarités. Le graphique de la trajectoire illustre bien les linéarités et présente aussi un sur ébavurage sur la portion qui succède l'entrée. La photo du résultat permet d'ailleurs d'observer le sur ébavurage de la portion supérieure du trou. Sur la partie inférieure gauche de la photo, une zone linéaire clairement observable sur le chanfrein se traduit par un sous ébavurage. En bref, la condition d'erreur de positionnement actuel ne permet pas un ébavurage constant et en contrôle dans ces conditions.

Tableau 5.12 Résultats du test #5



Étant donné les résultats obtenus lors de cette série de test, il convient de planifier une autre série de test. Cette série déterminera si une trajectoire décalée permet un contrôle de force stable, admet une erreur de positionnement et forme un chanfrein constant. L'erreur de positionnement mesurée entre les TCP des outils sur le robot est de 0.25 mm en X et en Y. Le calcul rapide de l'hypoténuse de ce triangle donne une erreur résultante dans la direction du rayon de la trajectoire circulaire d'environ 0.35 mm. Donc, pour se laisser une marge de manœuvre, la série de test suivante se fera avec la trajectoire programmée sur un décalage de 0.5 mm. Le *Tableau 5.13* décrit la série de tests supplémentaires sur l'impact de l'erreur de positionnement.

Tableau 5.13 Série de tests supplémentaires
sur l'impact de l'erreur de positionnement

Trajectoire sur un décalage de 0.5 mm		
# du test	Décalage en X (mm)	Décalage en Y (mm)
1	0.25	0.25
2	0.25	-0.25
3	-0.25	-0.25
4	-0.25	0.25

Les résultats d'ébavurage de cette série de test, présentés à la *Figure 5.16*, sont tous constant et exécutés avec contrôle. Les quatre résultats sont très similaires. Ceci démontre donc que le contrôle de force permet de compenser l'erreur de positionnement du robot avec ces conditions d'erreur et cette trajectoire programmée sur un décalage de 0.5 mm.

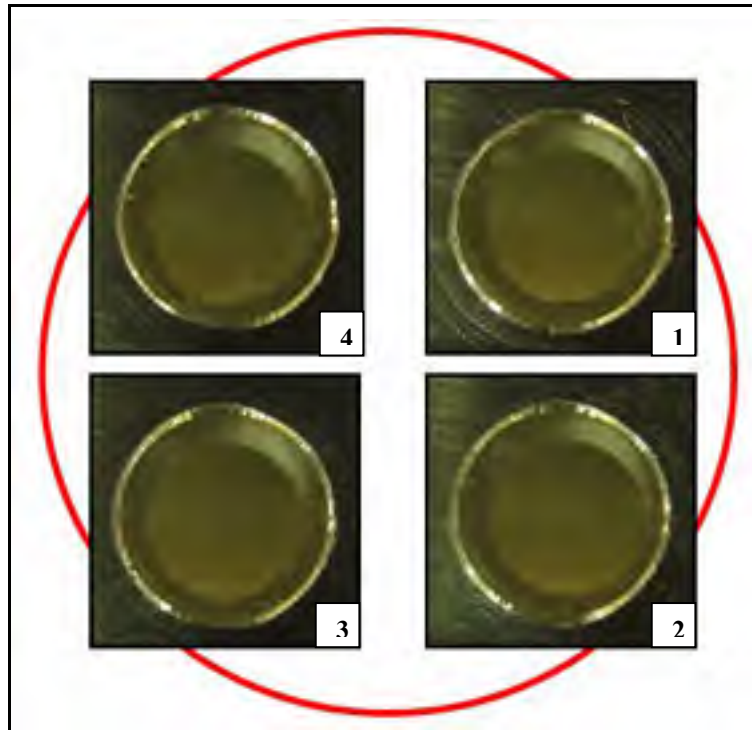


Figure 5.16 Résultat d'égavurage de la série de test supplémentaire sur l'impact de l'erreur de positionnement

5.3.5 Contrôle logiciel VS outil à compensation pneumatique

Dans le but de vérifier que le contrôle de force logiciel s'avère être le bon ou le mauvais choix technologique pour permettre l'utilisation d'outils rigides avec un robot dans une application d'égavurage de précision, une technologie plus simple a été testée. Il s'agit d'un moteur rotatif pneumatique qui comporte aussi une compensation radiale pneumatique (voir *Figure 3.18*). Le principe d'utilisation de cet outil est de programmer une trajectoire décalée dans la matière pour assurer un contact avec la pièce par l'entremise de la compensation pneumatique.

Deux séries de tests ont été effectuées pour évaluer la capacité d'utilisation de cet outil pour robotiser l'égavurage de précision. Dans un premier temps, la pénétration de l'outil ainsi que la compensation pneumatique ont été testées pour trouver une combinaison viable. La compensation pneumatique peut s'ajuster entre 20 et 60 PSI. L'abrasif utilisé est un super



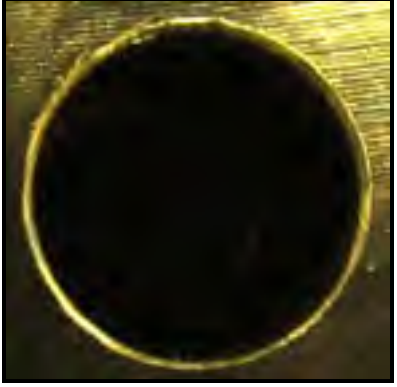
abrasif au P.B.S.[®] de forme conique et d'une agressivité de 260 grains. L'outil pneumatique a une vitesse de rotation unique de 65 000 RPM. Le plan de test est donc présenté dans le *Tableau 5.14*.

Tableau 5.14 Plan de test d'évaluation de l'outil à compensation pneumatique.

PARAMÈTRES	VARIABLES
Compensation pneumatique (PSI)	[20, 40, 60]
Pénétration de l'outil dans la matière (mm)	[0.25, 0.50, 0.75, 1.00]

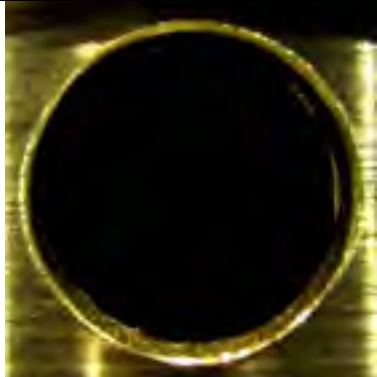

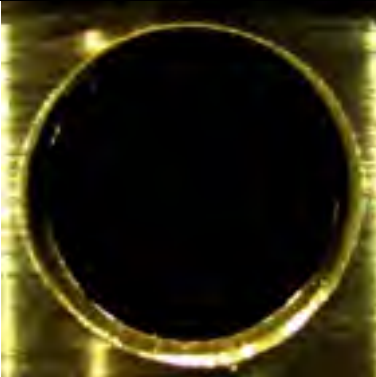
Le plan de test comporte donc douze tests. Cependant, il s'est avéré que les pénétrations d'outil dépassant 0.50 mm endommageaient l'abrasif. De plus, une compensation pneumatique dépassant les 40 PSI engendrait beaucoup de vibration qui se traduisait par des rebonds de l'abrasif sur la matière. La pression de la compensation étant trop forte, le système a atteint une rigidité qui ne convenait pas à l'application d'ébavurage dans ces conditions particulières. Le plan de test s'est donc réduit à quatre tests réalisables. Les trois résultats au *Tableau 5.15* représentent bien l'effet de la compensation pneumatique ainsi que l'effet de la pénétration de l'outil. Le premier test manque d'ébavurage dans la zone inférieure. Ce manque est associé à une trop faible pénétration de l'abrasif dans la matière. Il subsiste une légère erreur de positionnement qui n'est pas compensée par la pénétration de l'outil. Dans le second test, la pénétration de l'abrasif est augmentée de 0.25 mm à 0.50 mm. L'ajout de pénétration de l'outil compense en partie. Le chanfrein est plus constant, mais toujours légèrement sous ébavuré dans la zone inférieure. L'erreur de positionnement soupçonnée commence à se concrétiser. Apparemment, les erreurs de positionnement seraient mal compensées par le système pneumatique. Le dernier test de cette série évalue l'effet de la pression de compensation sur le résultat d'ébavurage. Un élément ressort en particulier de ce test. Une pression plus faible génère un chanfrein de plus petite taille. Le chanfrein paraît aussi plus constant à première vue. Par contre, le trou est encore légèrement moins ébavuré sur la portion inférieure. Une erreur de positionnement lors de cette série de test a été causée par un jeu mécanique dans l'outil à compensation pneumatique. C'est cette erreur de positionnement qui cause la variabilité du chanfrein.

Tableau 5.15 Effet de la pression de compensation et de la pénétration de l'abrasif pour l'outil à compensation pneumatique

40 PSI / 0.25 mm	40 PSI / 0.50 mm	20 PSI / 0.50 mm
		

La série de tests suivante a pour objectif de vérifier l'effet d'une erreur de positionnement sur le résultat d'ébavurage. Les tests ont été conduits avec le même abrasif. La pression de compensation et la pénétration de l'outil sont constantes pour tous les tests, soit 40 PSI et 0.50 mm de pénétration. La pression a été définie à 40 PSI pour faire ressortir davantage les défauts afin de faciliter l'analyse. Seul un décalage est imposé par rapport au centre du trou pour chaque test. Les résultats des tests présentés au *Tableau 5.16* démontrent avec évidence qu'une erreur de positionnement a un effet négatif considérable sur le résultat d'ébavurage avec l'outil à compensation pneumatique. Le décalage induit une pénétration d'outil différente sur le pourtour du trou. Dans le cas du troisième test, la pénétration était de 0.25 mm dans la zone supérieure du trou tandis qu'elle était de 0.75 mm dans la zone inférieure. D'une part, la compensation pneumatique n'arrive pas à éliminer les effets d'une erreur de positionnement, c'est donc dire qu'elle ne compense pas bien. D'autre part, l'erreur de positionnement a engendré une pénétration de 0.75 mm sur une portion du trou, ce qui a endommagé l'abrasif.

Tableau 5.16 Effet de l'erreur de positionnement sur le résultat d'ébavurage avec l'outil à compensation pneumatique

0.25 mm vers le haut	CENTRÉ	0.25 mm vers le bas
		

En bref, la compensation pneumatique de cet outil n'arrive pas à s'adapter aux erreurs de positionnement. La compensation fonctionne bien lorsque le positionnement est précis. Par contre, son utilisation est simple et facile à développer, mais n'est pas appropriée pour une application d'ébavurage de précision. Étant donné que la précision de positionnement est un facteur important pour réaliser un ébavurage constant, il est important de mentionner que l'outil comporte un jeu mécanique à cause de la compensation pneumatique qui résulte en une zone morte au TCP de l'outil dans laquelle l'abrasif peut bouger librement avant d'entrer dans la zone de compensation pneumatique. La *Figure 5.17* illustre la zone morte.

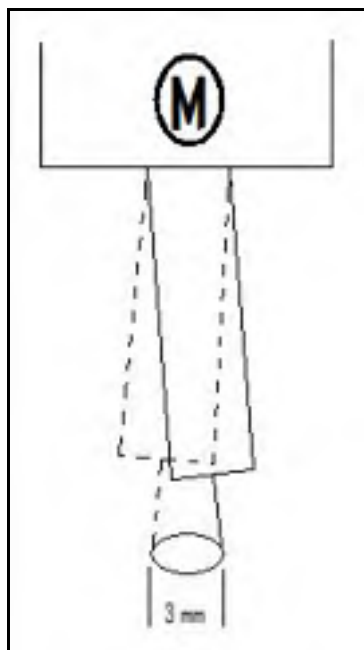


Figure 5.17 Représentation de la zone morte pour l'outil à compensation pneumatique

Cette zone morte, au point de fixation de l'abrasif dans le collet flexible, correspond à un cercle d'environ trois millimètre de diamètre. De plus, dans un contexte d'automatisation où la polyvalence est recherchée, un changement d'outil automatique devient un pré requis que cet outil ne rencontre pas. Qui plus est, une vitesse de rotation unique n'offre pas beaucoup de polyvalence non plus. Pour ces raisons, la solution d'un outil à compensation pneumatique comme celui testé dans ce rapport a été rejetée au profit de l'utilisation du contrôle de force logiciel qui a un meilleur potentiel de réussite dans l'application d'ébavurage de précision du présent projet.

CHAPITRE 6

RÉSULTATS DU DÉVELOPPEMENT DES TECHNOLOGIES ET DES PROCÉDÉS D'ÉBAVURAGE

Le développement de l'utilisation du contrôle de force a permis d'atteindre la maîtrise de l'usage d'outils rigides pour réaliser l'ébavurage robotisé de précision sur des pièces aéronautiques critiques. Grâce à la maîtrise du contrôle de force, des procédés d'ébavurage génériques ont été développés pour des géométries où l'enlèvement de matière nécessite l'usage d'outils rigides tels que décrits au chapitre 5. Ce chapitre présente donc les résultats du développement de l'utilisation du contrôle de force ainsi que le développement des procédés génériques d'ébavurage robotisé des trois géométries à l'étude dans ce document, soit les trous, les *chambrages* et les *toits*. Les résultats sont présentés uniquement de façon visuelle pour des raisons de confidentialité.

6.1 Résultats de l'utilisation du contrôle de force pour l'ébavurage robotisé

Le contrôle de force peut être utilisé pour différentes opérations d'ébavurage. Le polissage est à la base une application d'ébavurage qui se prête bien au contrôle de force. Les outils sont flexibles et permettent des erreurs de positionnement sans que l'impact soit grand sur le résultat. Le contrôle de force permet de maintenir un contact à pression constante pour assurer un polissage complet et uniforme. De plus, le contrôle de force peut aussi être très intéressant pour l'utilisation d'outils rigides comme les outils de coupe.

Étant rigides, ces outils permettent beaucoup moins l'erreur de positionnement. Pour les procédés étudiés, la force de contact est directement proportionnelle aux enlèvements de matière. Or, toutes les pièces fabriquées comportent des tolérances dimensionnelles. De plus, l'utilisation d'un robot rend l'exécution de la tâche peu précise en positionnement. C'est exactement à ce moment que le contrôle de force devient intéressant. L'objectif de son utilisation est de compenser les erreurs de positionnement du robot ainsi que les variations dimensionnelles de la pièce et du montage. L'objectif du projet était non seulement de

réaliser l'ébavurage robotisé d'un chanfrein à l'aide d'un outil rigide, mais aussi de faire un ébavurage de précision, c'est-à-dire former un chanfrein constant dans un intervalle de tolérance déterminé. La *Figure 6.1* illustre par des images l'évolution de la maîtrise du contrôle de force. Chaque résultat est obtenu avec la même trajectoire d'ébavurage. La localisation du trou a été faite avec le palpeur et aucune correction n'a été appliquée pour améliorer la précision du positionnement.

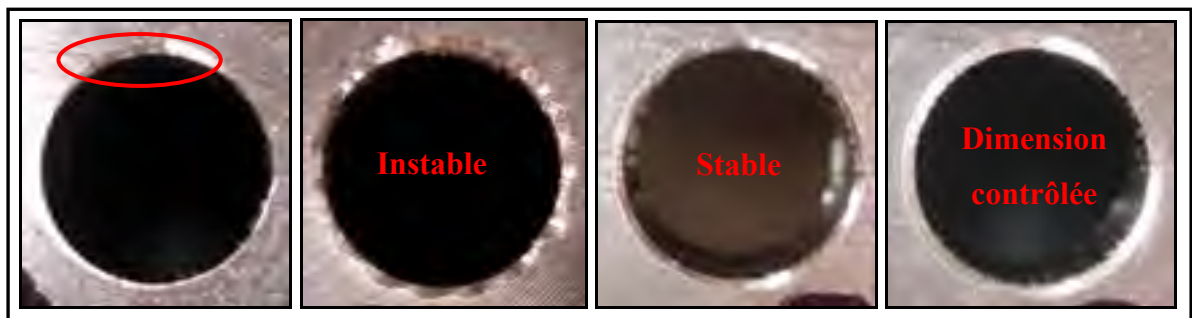


Figure 6.1 Évolution du contrôle de force : (1) Contrôle en position, (2) Contrôle de force instable, (3) Contrôle de force stable et (4) Contrôle de force stable et dimensionnel maîtrisé

La première image montre le résultat d'ébavurage pour une routine sans contrôle de force. Seul le contrôle de position est utilisé. Le robot suit la trajectoire sans s'adapter au contour réel à suivre. L'erreur de positionnement est flagrant puisque le trou est seulement ébavuré sur la portion supérieure (encerclé rouge). La seconde image montre le résultat d'ébavurage pour une routine avec un contrôle de force. Cependant, le contrôle est instable pour cette expérimentation parce que l'utilisation du contrôle de force n'était pas maîtrisée. Deux éléments sont à noter à propos du résultat. D'une part, contrairement au résultat obtenu avec le contrôle en position, il y a eu un contact sur tout le pourtour du trou. D'autre part, le résultat est très inconstant. La principale cause de ce mauvais résultat est un manque de point sur la trajectoire. Il y avait une vingtaine de points sur cette trajectoire. Il est d'ailleurs possible de les compter en calculant le nombre de récession dans la matière. Comme il a été mentionné dans le chapitre 5, il est important d'avoir suffisamment de points pour que la trajectoire programmée représente fidèlement la trajectoire réelle. Il faut une bonne balance entre le contrôle de force et le contrôle de position pour obtenir un contrôle globalement stable. Finalement, les images (3) et (4) illustrent les résultats d'un contrôle de force stable

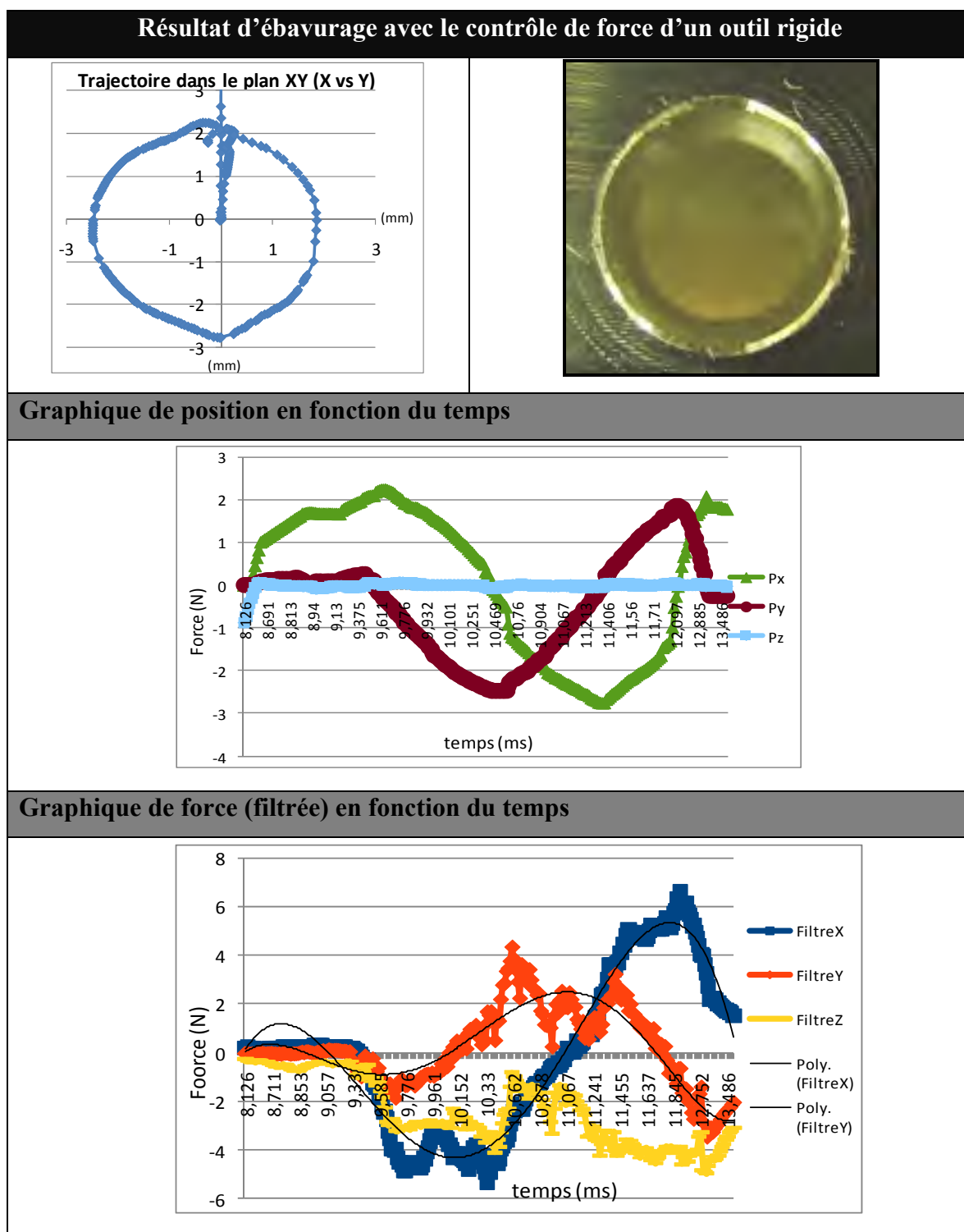
ainsi qu'un dimensionnel maîtrisé, soit un chanfrein environ 50% plus gros sur l'image (3) que sur l'image (4).

Le développement de l'utilisation du contrôle de force a permis de déterminer une combinaison de paramètres de force qui admet l'utilisation d'outils rigides pour faire l'ébavurage robotisé de supers alliages aéronautiques. Cette combinaison de paramètres de force permet un suivi de trajectoire fluide, un contrôle de force stable et un résultat d'ébavurage constant.

Le *Tableau 6.1* présente les graphiques de position et de force en fonction du temps ainsi que la trajectoire dans le plan XY et une image du résultat d'ébavurage associé. L'ébavurage a été exécuté dans des conditions réelles d'utilisation du robot, soit avec une erreur de positionnement de 0.25 mm en X et 0.25 mm en Y. La trajectoire a été programmée avec un décalage sur le rayon de 0.50 mm de manière à permettre des erreurs de positionnement de l'ordre de grandeur de ceux qui viennent juste mentionnées. La trajectoire dans le plan XY démontre une belle circularité et une fluidité du mouvement. L'image du résultat d'ébavurage, quant à elle, démontre un ébavurage fluide et constant. Un chanfrein a été formé grâce à l'usage d'un outil rigide employé sur un robot.

Quant au graphique de la position en fonction du temps, il ne comporte pas de discontinuités marquées. Les déplacements sont plutôt fluides bien qu'ils ne soient pas parfaits. La tendance sinusoïdale d'une trajectoire circulaire est observable. Finalement, le graphique de force en fonction du temps présente un contrôle de force bien réalisé compte tenu des vibrations engendrées par l'ébavurage. Les données mesurées au capteur ont été filtrées grâce à un filtre passe bas afin de clarifier l'observation du graphique et de faciliter son analyse. La tendance sinusoïdale est bien définie pour l'application de la force dans la direction X. Cette tendance est moins bien suivie dans la direction Y, mais l'application de la force tend tout de même à vouloir s'approcher d'une courbe sinusoïdale. Il faut prendre en considération qu'il y a une erreur de positionnement qui oblige un travail plus exigeant de la boucle de contrôle de force pour obtenir la stabilité.

Tableau 6.1 Résultat d'un ébavurage robotisé avec outil rigide



6.2 Résultats des procédés génériques d'ébavurage

Le contrôle de force offre davantage de polyvalence au robot et, de ce fait, permet le développement de procédés d'ébavurage incluant des outils rigides. Il permet aussi, par la même occasion de réaliser toutes les étapes d'ébavurage allant de l'enlèvement de la bavure jusqu'au polissage des surfaces. Alors, plusieurs procédés d'ébavurage génériques ont été développés pour la robotisation. Certains ont nécessité l'usage du contrôle de force pour permettre d'intégrer des outils rigides dans le procédé comme c'est le cas pour les trous et les *chambrages*. D'autres procédés, comme celui des *toits*, utilisent des outils flexibles et n'ont pas nécessité l'usage du contrôle de force.

6.2.1 Les Trous

Étant donné la variété et la complexité des trous, le contrôle de force a, dès le départ, été défini comme nécessaire à la réalisation efficace et polyvalente de leur ébavurage. Certains trous requiert un chanfrein, d'autres un rayon. Étant donné que le procédé pour former un rayon comporte aussi les étapes pour former un chanfrein, le procédé et les résultats pour former le rayon seront présentés.

Le procédé est divisé en trois étapes : (1) l'enlèvement de la bavure et la formation du chanfrein, (2) l'enlèvement des bavures secondaire et la formation du rayon sur l'arête interne du chanfrein, puis (3) la formation du rayon sur l'arête externe du chanfrein et le polissage des surfaces. Les abrasifs utilisés pour le procédé sont présentés à la *Figure 6.2*.

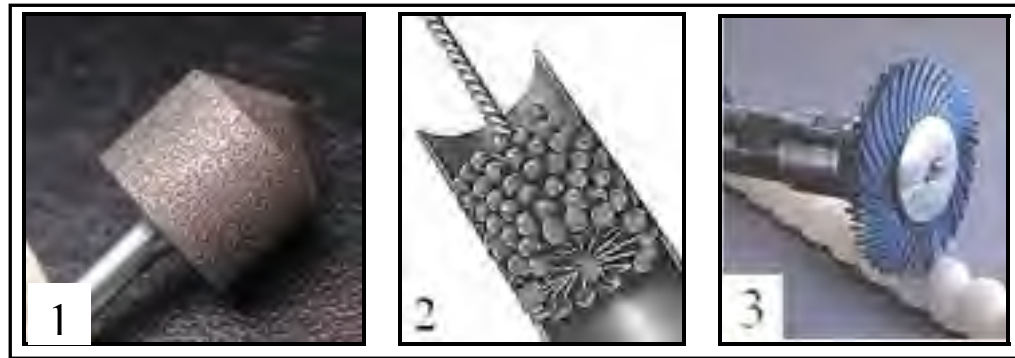


Figure 6.2 Outillage pour l'ébavurage des trous : (1) Abrasif P.B.S[®], (2) Brosse de rodage, (3) Brosse à poils hérissés radiale

L'abrasif rigide au P.B.S[®] est utilisé avec un contrôle de force pour réaliser un chanfrein constant. Par la suite, étant donné que les autres étapes utilisent des outils flexibles, il n'est pas nécessaire de se servir du contrôle de force pour exécuter ces étapes de finition. La *Figure 6.3* présente le résultat d'ébavurage pour la formation d'un rayon sur l'arête d'un trou qui passe au travers une surface plane. L'image de gauche montre l'arête du trou non ébavurée. La deuxième et troisième image montrent successivement l'arête chanfreinée, puis le rayon formé après les trois étapes d'ébavurage. Finalement, la dernière image montre une section du rayon au comparateur optique. Un rayon qui s'approche de la perfection y est présenté. La transition d'une surface à l'autre est très fluide.

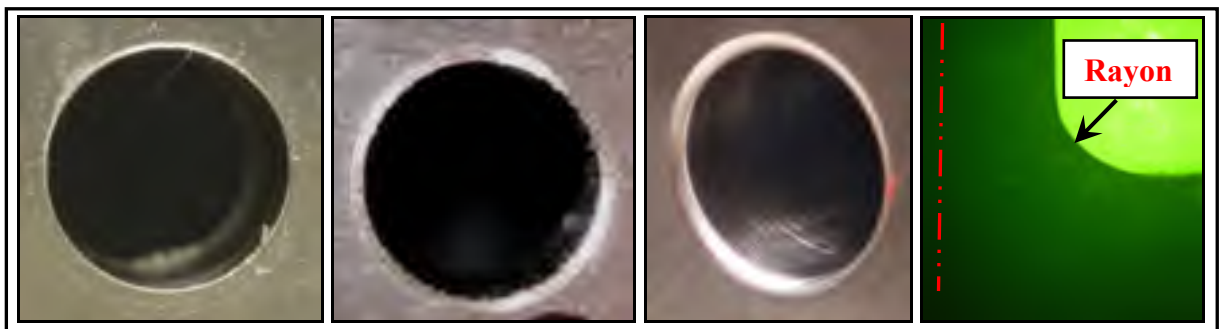


Figure 6.3 Étapes de formation d'un rayon sur l'arête d'un trou (sur une surface plane)

La robustesse et la polyvalence de ce procédé ont aussi été testées sur l'arête d'un trou qui traverse une surface cylindrique. De plus, c'est l'arête qui se trouve à l'intérieur de la pièce qui a été ébavurée. Qui plus est, la bavure est beaucoup plus grosse puisqu'il s'agit du côté

du trou où le foret sort de la matière lors du perçage. Le niveau de complexité est donc plus élevé que le cas qui vient d'être présenté. Pour réaliser l'ébavurage de cette arête, un outil à cône inversé a été utilisé pour travailler dans l'axe du trou depuis l'extérieur de la pièce.

Dans ce cas, une bavure sévère a été enlevée en une seule passe tout en formant un chanfrein sur la même passe. La *Figure 6.4* présente le type d'outil utilisé, la bavure et le chanfrein formé par l'ébavurage. Ce résultat démontre la robustesse et la polyvalence du procédé d'ébavurage robotisé des trous accessibles en suivi de trajectoire.

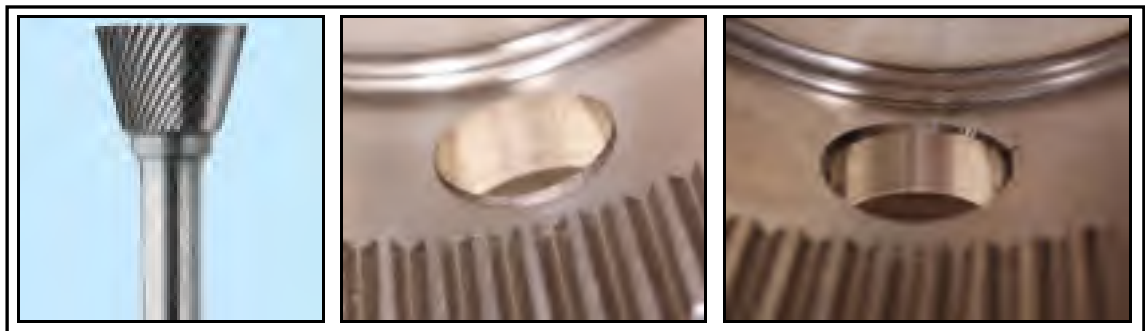


Figure 6.4 Chanfreinage de l'arête interne d'un trou : l'outil, la bavure et le chanfrein

6.2.2 Les Chambrages

Étant donné qu'ils représentent une grosse proportion du volume de production, les *chambrages* de type simple seront présentés comme exemple pour les procédés d'ébavurage des *chambrages*. Puisque le suivi de la trajectoire est complexe et qu'un outil rigide est nécessaire à l'ébavurage de l'arête du *chambrage*, le contrôle de force est utilisé pour réaliser l'enlèvement de matière et la formation du chanfrein sur l'arête. Grâce au développement pour l'ébavurage des trous, une recette de l'utilisation du contrôle de force est déjà définie pour obtenir un ébavurage stable. L'outil utilisé pour l'ébavurage des *chambrages* est une lime. La *Figure 6.5* présente l'arête avec une bavure (image de gauche) et le résultat ébavuré de l'arête (image de droite) avec une zone agrandie de l'arête ébavurée.

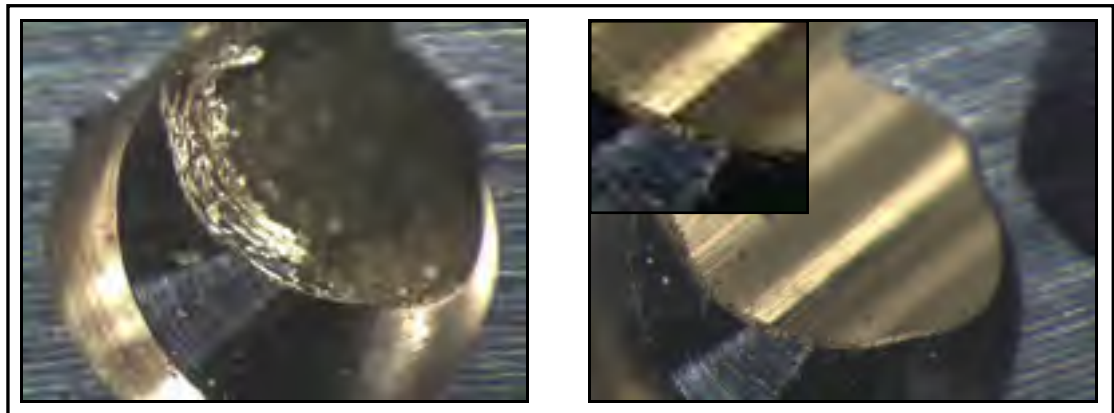


Figure 6.5 Bavure avant et chanfrein après ébavurage

6.2.3 Les Toits

L'ébavurage des *toits* est en soit beaucoup plus simple que les deux autres géométries. Il s'agit d'ébavurer une arête linéaire facilement accessible. Étant donné sa simplicité, le contrôle de force n'a pas été nécessaire pour réaliser l'ébavurage des *toits*. L'enlèvement de la bavure et la formation du chanfrein se font dans une seule et même étape. L'abrasif utilisé est une mousse du type *unitized wheel* présenté à la Figure 4.14.

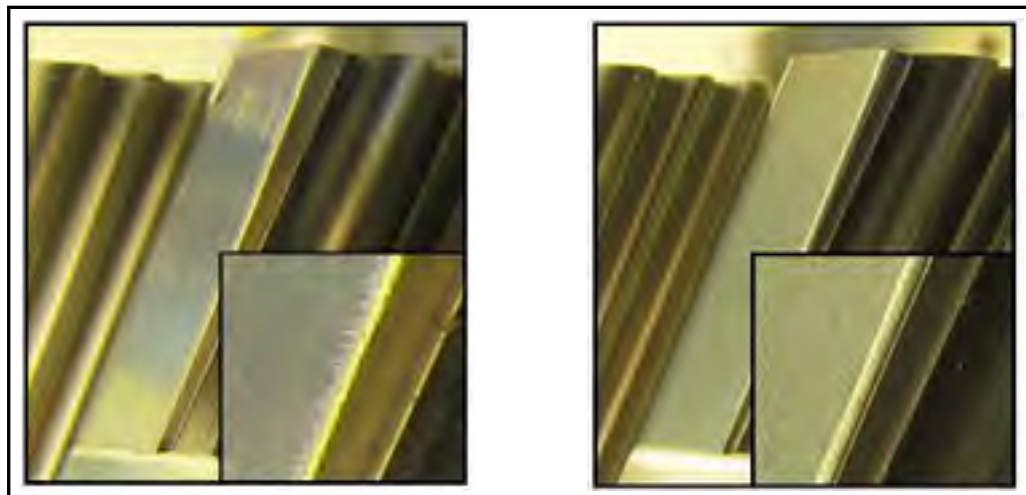


Figure 6.6 Résultat d'ébavurage des *toits* : opération d'ébavurage à gauche et opération au baril de finition à droite

Une opération de finition sur le robot n'est pas nécessaire puisque la pièce passe par une opération successive au baril de finition. La pièce est plongée dans un média qui uniformise le fini de surface sur toute la pièce. Dans ce cas, c'est suffisant pour obtenir le résultat escompté. La *Figure 6.6* montre le résultat d'ébavurage. L'image de gauche présente le résultat après ébavurage avec l'abrasif *unitized wheel*. Dans le coin inférieur droit de l'image, une zone agrandie de l'image illustre le fini grossier obtenu après l'ébavurage. De plus, le fini de la surface critique adjacente est affecté par l'ébavurage. Par contre, l'image de droite présente un excellent résultat après le baril de finition. Encore une fois, une section agrandie de l'image permet de voir le détail de l'arête. Après le baril de finition, le chanfrein sur l'arête est très bien défini et le fini de surface est poli. De plus, le fini de la surface adjacente critique est maintenant uniforme et aucune des marques superficielles présentent à l'étape précédente sont maintenant visibles.

Plusieurs procédés génériques ont été développés grâce à une connaissance approfondie du produit à fabriquer et à une recherche intensive d'abrasifs. Certains procédés ont nécessité le développement d'une nouvelle technologie de contrôle pour rendre adaptable et polyvalent l'usage d'un robot pour effectuer des tâches d'ébavurage de précision. La technologie en question est le contrôle de force logiciel et son utilisation a été développée pour permettre l'emploi d'outils rigides avec un robot.

Le développement de l'usage du contrôle de force est un succès. Il permet d'assurer un contact entre l'outil et la matière et offre un contrôle stable pour des résultats d'ébavurage constants.

CONCLUSIONS

Au terme de ce projet, il est temps de faire le bilan des réalisations par rapport aux objectifs fixés d'après les problématiques ciblées. Deux objectifs généraux ont été définis au début du projet. Le premier était de développer des procédés d'ébavurage génériques en choisissant une technologie polyvalente qui rencontre les besoins spécifiques de l'aéronautique. Le second objectif était d'automatiser des opérations d'ébavurage manuelles dans le but de mieux contrôler les procédés et de diminuer les coûts. D'après les objectifs, des solutions ont été prévues pour résoudre les problèmes. L'un des objectifs spécifiques au départ était de démontrer la faisabilité de robotiser toutes les opérations d'ébavurage. Plus précisément, le but était de robotiser l'enlèvement de matière et la formation d'un chanfrein avec des outils rigides à l'aide d'un contrôle adaptatif en force. Les deux autres objectifs spécifiques étaient de développer des procédés génériques par géométrie, puis que ces procédés soient robustes et répétables.

La maîtrise de l'utilisation du contrôle de force a été atteinte. L'ébavurage robotisé de précision a été réalisé avec des outils rigides. Les résultats montrent que le contrôle est stable et permet d'obtenir un chanfrein constant et de faire varier le dimensionnel en ajustant l'amplitude de la force désirée. L'ébavurage avec un contrôle de force a été réalisé tant avec un outil rotatif qu'avec un outil non rotatif. La robustesse de l'utilisation du contrôle de force a été démontrée en attaquant des géométries de trous simples et complexes, des bavures de petite et de grande dimension, en simulant des erreurs de positionnement et même en attaquant une géométrie différente (*chambrages*).

Des procédés d'ébavurage génériques ont été développés pour trois géométries. Ces procédés pourront être transférés pour l'ébavurage de plusieurs pièces comportant des géométries similaires. Ces procédés ont été mis à l'épreuve face à la variabilité des bavures et des dimensions des géométries. Ils sont suffisamment robustes pour prendre en charge ces variabilités.

Finalement, la répétabilité qu'offrent les procédés d'ébavurage développés devra être mise à l'épreuve à grande échelle sur des pièces de production. La durée de vie utile des abrasifs devra être définie de sorte à atteindre la répétabilité recherchée.

RECOMMANDATIONS

Dans le but de poursuivre le travail présenté dans ce mémoire, quelques pistes devraient continuer à être explorées pour améliorer la capacité des robots à effectuer des tâches de précision et pour accroître l'automatisation des opérations d'ébavurage en industrie :

- Développer des techniques de calibration des systèmes robotisés dans le but d'améliorer leur capacité à effectuer des tâches de précision,
- Étudier les multiples technologies d'ébavurage automatisées dans le but d'exploiter les avantages de chacune,
- Analyser les possibilités d'amélioration du contrôle de force pour des applications d'ébavurage robotisées,
- Étudier spécifiquement les abrasifs disponibles sur le marché pour entrevoir des possibilités de développement pour des applications d'ébavurage de pièces aéronautiques.

Enfin, plus spécifiquement pour le projet dont il a été question dans ce mémoire, il faudrait mettre en place avec l'automatisation de l'ébavurage un système de contrôle des procédés afin de continuer d'améliorer la qualité des opérations d'ébavurage.

ANNEXE I

TOLÉRANCES DE FORME ET DE POSITION

Tableau résumé des tolérances de forme et de position

Symboles et caractéristiques à tolérer		Exemples d'application		
		Position sur le dessin	Tout de tolérance	Interprétation
Tolérances de forme	Profilure d'une ligne ou d'un coin			L'axe du cylindre dont la cote est reliée au cadre de la tolérance doit être compris dans une zone cylindrique de 0,05 de diamètre.
	Planité d'une surface			La surface toléranciée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,04.
	Circularité d'un diamètre d'un cylindre, d'un cône, etc.			Le contour de chaque section droite doit être compris dans une couronne circulaire de largeur 0,05.
	Cylindricité			La surface toléranciée doit être comprise entre deux cylindres coaxiaux dont les rayons diffèrent de 0,05.
	Forme d'une ligne géométrique (profil ou contour)			Dans chaque section parallèle au plan de la projection, le profil considéré doit être compris entre deux lignes enveloppes des cordes de diamètre 0,04 dont les centres sont situés sur une ligne ayant le profil géométriquement correct.
	Forme d'une surface géométrique			La surface toléranciée doit être comprise entre deux surfaces enveloppes des sphères de diamètre 0,04 dont les centres sont situés sur une surface ayant le forme géométrique correct.
Tolérances de position	Parallelisme d'une ligne (axe) ou d'une surface par rapport à une droite ou un plan de référence			La surface toléranciée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,05 et parallèles à la surface intérieure A (surface de référence).
	Perpendicularité d'une ligne (axe) ou d'une surface par rapport à une droite ou un plan de référence			L'axe du cylindre dont la cote est reliée au cadre de tolérance doit être compris entre deux droites parallèles distantes de 0,05 perpendiculaires au plan de référence et se trouvant dans le plan indiqué sur le dessin.
	Inclinaison d'une ligne (axe) ou d'une surface par rapport à une droite ou un plan de référence			Le plan tangent doit être compris entre deux droites parallèles distantes de 0,05 et formant un angle de 60° avec le plan de référence.
	Localisation de lignes, axes ou surfaces entre eux ou par rapport à un ou plusieurs éléments			L'axe du trou doit être compris dans une zone cylindrique d'un diamètre de 0,05 dont l'axe est dans la position théorique calculée.
	Concurrence d'un axe ou d'une surface par rapport à un ou plusieurs éléments			L'axe du cylindre dont la cote est reliée au cadre de tolérance doit être compris dans une zone cylindrique de diamètre 0,05 coaxiale à l'axe du cylindre de référence A.
	Symétrie d'un plan, surface ou d'une ligne géométrique (profil) par rapport à une droite ou un plan de référence			Le plan médian de la tolérance doit être compris entre deux plans parallèles distants de 0,05 et symétriques par rapport au plan médian de l'élément de référence A.
Tolérances de finition	Arrachement simple d'un élément sur l'axe de révolution			Le brèvement simple radial ne doit pas dépasser 0,05 dans chaque plan de mesure pendant une révolution complète autour de l'axe de référence A-B.
	Arrachement total d'un élément sur l'axe de révolution			Le brèvement total radial ne doit pas dépasser 0,05 en chaque point de la surface pendant plusieurs révolutions autour de l'axe de référence A-B et avec un mouvement axial relatif entre la pièce et l'instrument de mesure. Le mouvement doit être guidé le long d'une ligne de surface de forme indépendante parfaite étant des positions correctes de l'axe de référence.

Figure-A I-1 Tolérance de forme et de précision

Tirée de CVM (2006 [8])

ANNEXE II

LISTE CATÉGORISÉE DES PROCÉDÉS D'ÉBAVURAGE

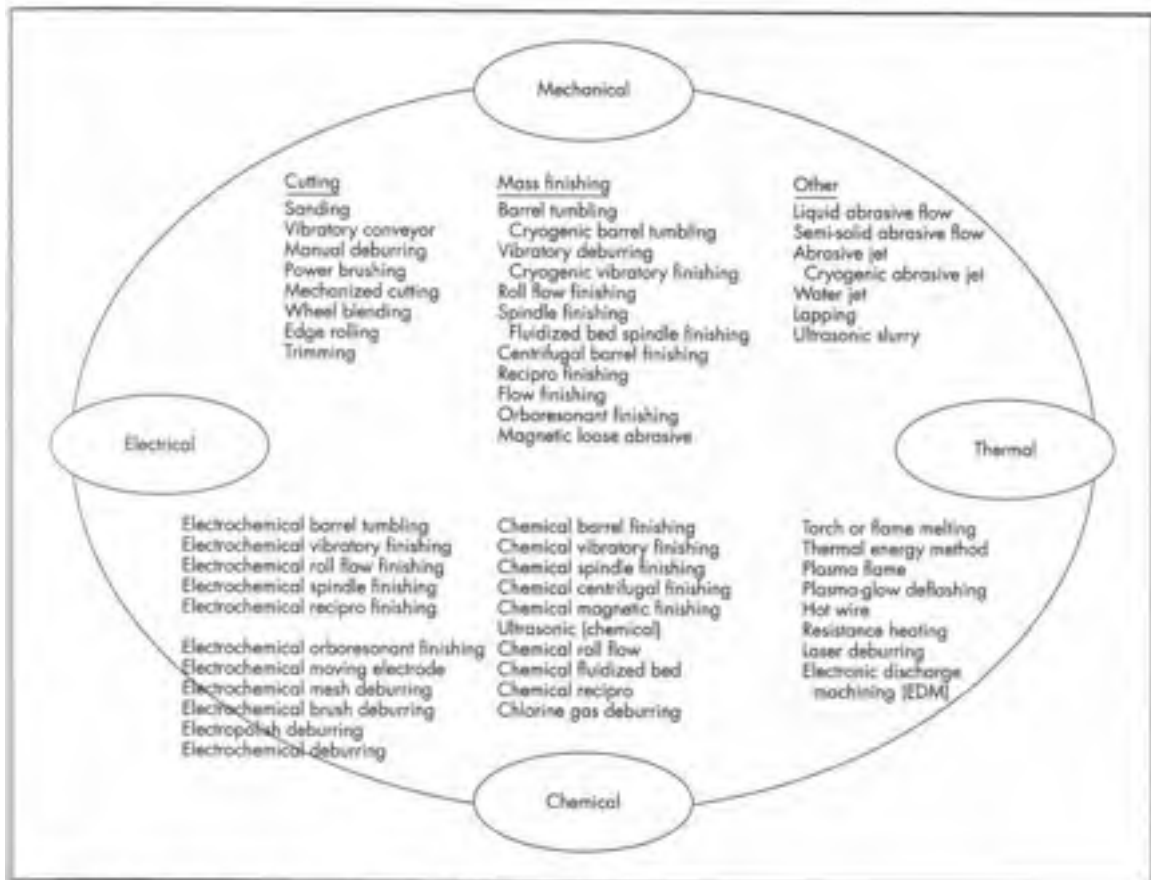


Figure 1-6. Principal deburring processes and their removal mechanisms.

Figure-A II-1 Principaux procédés d'ébavurage
Tirée de Gillespie (1999, p.7 [14])

LISTE DES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ABB. En ligne. 2005. *Application manual: Force Control for Machining*. http://www.abbrobots.co.uk/files/3HAC027595-001_revA_en.pdf. Consulté la dernière fois en mai 2011.
- [2] ABB. *Operating manual Machining PowerPac RobotStudio 5.12*, Document ID : 3HAC030420-001, revision B.
- [3] ABB. *Manuel de référence technique RAPID*, Document ID : 3HAC16581-4, révision E.
- [4] Abderrahim et A.R. Whittaker, 1999. *Kinematic model identification of industrial manipulators*. Département de génie mécanique. Université de Glasgow, Écosse. 8 pages.
- [5] Burnham, Marvin. 1981. *Burrs formed in producing small holes*. SME: TP81PUB155.
- [6] Conrad, Kevin L. et al. July 13 to 19, 2000. *Robotic calibration issues: accuracy, repeatability and calibration*. Proceeding of the 8th Mediterranean conference on control & automation, Rio, Patras, Grèce. 6 pages.
- [7] Craig, John J.. 2005. *Introduction to ROBOTICS*, Mechanicals and control, 3eme édition. Pearson, NJ USA. 400 pages.
- [8] Département de génie mécanique, Cégep du Vieux-Montréal. *Dessins d'ensemble et tolérances géométriques*. Cours 241-A41-VM.
- [9] Dornfeld, David. August 11 to 13, 2009. "Course Notes", *Seminar of burr formation & minimisation*. ÉTS, Montréal, Canada.
- [10] Giblin, David Joseph, Ph.D. 2007. *The interaction of force and geometry in robotic manipulation*. Connecticut: University of Connecticut, 147 pages; AAT 3252581.
- [11] GIESECKE, MITCHELL, SPENCER, HILL, DYGDON. 1982. *Dessin technique*. Édition du Renouveau Pédagogique Inc., Canada. 773 pages.
- [12] Gillespie, LaRoux K. 1980. *Deburring small intersecting holes*. SME: TP80PUB205.
- [13] Gillespie, LaRoux K. 1987. *Robotic Deburring Handbook*. Society of Manufacturing Engineers, ISBN : 0-87263-297-0. 140 pages.
- [14] Gillespie, LaRoux K.. 1999. *Deburring and Edge Finishing Handbook*. ISBN : 0791800881, Society of Manufacturing Engineers. Michigan, USA. 416 pages.

- [15] Gillespie, LaRoux K. 2003. *HAND DEBURRING – Increasing Shop Productivity*, Society of Manufacturing Engineers, ISBN : 0-87263-642-9. Michigan, USA. 530 pages.
- [16] Katsura, S. ; Matsumoto, Y. ; Ohnishi, K., Feb. 2007, *Modeling of force sensing and validation of disturbance observer for force control*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v 54, n 1, 530-8, Dept. Of Syst. Design Eng., Keio Univ., Yokohama, Japan.
- [17] Kazerounian, K. et K.C. Gupta. 1986. *A target tracking manipulation theory for robots*, International journal of robotics and automation.
- [18] KRAR, Steve F., J. William OSWALD, Joseph E. ST-AMAND. 1980. *L'Ajustage mécanique, 2^eéd., Chenelière/McGraw-Hill*. Montréal. 530 pages.
- [19] Liang Liao et al. 2008. *Modeling and control of automated polishing\deburring process using a dual-purpose compliant toolhead*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 48. p.1454-1463.
- [20] Massarsky, Michael et David A. Davidson. 8-10 septembre 2004, *Turbo-abrasive machining for edge and surface finishing*, SME, TP04PUB349, Chicago, Illinois, USA. 10 pages.
- [21] Motta, José Mauricio S.T. et al., 2001. *Robot calibration using a 3D vision-based measurement system with a single camera*. Département de génie mécanique. Université du Brésil. 11 pages.
- [22] Peterman, Loyal M.. 2004. *P.B.S[®]. VS ELECTROPLATING*. ABRASIVE TECHNOLOGY: TECHVIEW, www.abrasive-tech.com, 4 pages.
- [23] Raibert, M.H. et J.J. Craig. 1981. *Hybrid position/force control of manipulators*, Journal of dynamic systems, measurement and control. p.126-133.
- [24] Raucet et al., 1991. *Influence of inertial parameters on the positional accuracy of a robot*. Université Catholique de Louvain, Belgique. 6 pages.
- [25] Renishaw. Site web de Renishaw. <http://www.renishaw.com/en/revo-gains-new-momentum--7918>. Consulté le 29 mars 2011.
- [26] Salmon, S.C. et al. 6 au 8 septembre 2006. *Grinding aerospace materials with CBN in water-based fluids*, Competitive manufacturer conference at IMTS. Chicago, Illinois. 14 pages.

- [27] Scheider, Alfred. 1989. *New technology in flexible abrasive tools, for non-traditional finish machining of holes, bores, and internal surfaces*. SME: TP89PUB151.
- [28] Stone HW, 1987. *Kinematic modeling, identification, and control of robotic manipulators*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- [29] Tomastik, Robert N. et al. 1997. *Concept for Robotic Deburring Using Multipass Active Control*. Journal of Vibration and Control, 3. p.351-369.
- [30] Watts, James H. 13-16 février 1989, DEBURRING AND SURFACE CONDITIONNING. *Abrasive monofilaments – factors that affect brush tool performance*, SME, MR89-112, San Diego, California, USA. 15 pages.